



Studijní program N 2301 – Strojírenství

Materiály a technologie  
Zaměření strojírenská metalurgie

# **Metalurgická příprava taveniny slitin hliníku pro výrobu odlitků vysokotlakým litím**

Metallurgical preparation of the melt of aluminium alloys for  
production of castings with the help of high-pressure molding

Bc. Jan Hentzel  
KSP – SM – 569

Vedoucí diplomové práce:	Prof. Ing. Iva Nová, CSc.
Konzultant diplomové práce:	Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 70  
Počet tabulek: 8  
Počet obrázků: 29  
Počet grafů: 9

Datum: 24.5.2013



## **ZADÁNÍ**





## A N O T A C E

### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: N2301 – Strojírenství

Student: Bc. Jan Hentzel

Téma práce: Metalurgická příprava taveniny slitin hliníku pro výrobu odlitků vysokotlakým litím

Metallurgical preparation of the melt of aluminium alloys for production of castings with the help of high-pressure molding

Číslo DP: KSP – SM –569

Vedoucí DP: prof. Ing. Iva Nová, CSc. - *TU v Liberci*

Konzultant DP: prof. Ing. Iva Nová, CSc. - *TU v Liberci*

#### **Abstrakt:**

Diplomová práce se zabývá výrobou odlitků ze slitin hliníku vysokotlakým litím. Úvodní teoretická část je věnována především hliníkovým slitinám a tavícím agregátům používaných při vysokotlakém lití. V následující praktické části je pozornost věnována zejména problematice naplynění hliníkových slitin, jeho příčinám, případným důsledkům, ale zejména eliminaci možných důsledků.

#### **Abstract:**

The diploma work deals with producing casts from aluminium alloy in the process of high-pressure casting. The theoretical part focuses mainly on aluminium alloys and casting aggregates which are used in the process of high-pressure casting. The practical part pays particular attention to the presence of gas in aluminium alloys, specifically the reasons for the gas presence, the prospective consequences and their possible elimination.





**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. května 2013

.....

Bc. Jan Hentzel  
Česká ul. 171  
463 12 Liberec 25





## Poděkování

Předně bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Vrtílkovi z firmy Šebesta spol. s.r.o. a panu Janu Nepovímovi z firmy DGS Druckguss Systeme s.r.o., za mnoho cenných a odborných konzultací a připomínek zejména z jejich dlouholeté praxe, bez kterých by tato práce nevznikla. V neposlední řadě bych také velmi poděkoval vedoucí mé diplomové práce prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za bezpočet rad a odborné vedení.





## Obsah

### Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE .....</b>	<b>10</b>
2.1 Charakteristika hliníku a slitin Al pro výrobu odlitků vysokotlakým litím [3] .....	10
2.1.1 Rozdělení slitin hliníku [3] .....	11
2.1.2 Značení slitin hliníku na odlitky [1] .....	13
2.1.3 Vlastnosti vybraných slitin pro lití pod tlakem [1] .....	14
2.1.4 Vybrané přísadové prvky ve slitinách Al-Si [1] .....	16
2.2. Příprava taveniny slitin Al pro vysokotlaké lití [2] .....	18
2.2.1 Tavení [1] .....	19
2.2.2 Požadavky na tavící pece [1] .....	22
2.2.3. Tavící agregáty [1], [4], [7] .....	24
2.2.3.1 Šachtové pece .....	24
2.2.3.2 Kelímkové pece .....	27
2.2.3.3 Dávkovací pece .....	32
2.2.4 Naplynění hliníkových slitin [1], [4] .....	35
2.2.4.1 Zdroje vodíku [1] .....	37
2.2.4.2 Odplyňování [1], [2] .....	38
2.2.5 Spektrální analýza [9], [10] .....	40
2.3 Časté odlitky ze slitin hliníku odlévaných vysokotlakým litím v ČR .....	42
<b>3. PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE .....</b>	<b>44</b>
3.1. Metalurgický proces přípravy slitin hliníku pro výrobu odlitků vysokotlakým litím .....	44
3.1.1 Odplyňování probubláváním inertního plynu [1],[2] .....	46
3.1.2 Využití rafinační soli [1],[2] .....	47
3.2 Měření naplynění taveniny – metoda dvojího vážení [1],[2] .....	48
3.3 Shrnutí postupu měření .....	50
3.3.1 Postup měření chemického složení .....	52
3.4 Seznam použitého zařízení .....	53
3.4.1 Tavící agregáty .....	53





3.4.2 Doplnující zařízení .....	53
3.5 Výsledky měření .....	54
<b>4. Diskuse poznatků .....</b>	<b>60</b>
<b>5. Závěr .....</b>	<b>62</b>
<b>6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>65</b>
<b>8. Přílohy .....</b>	<b>67</b>
Příloha 1 .....	67



## 1. Úvod

Tlakové lití je jedna z několika metod pro výrobu odlitků z neželezných kovů. Tato metoda je hojně využívána především u velkých sérií, kdy je cílem získat rozměrově i hmotnostně menší odlitky s tenkou stěnou, přesnými rozměry, hladkými povrchy a to vše u poměrně složité geometrie odlitku.

Právě jednotlivá průmyslová odvětví, jakými jsou např. automobilový, motocyklový a letecký průmysl s výhodou využívají lití pod tlakem pro výrobu velkého množství odlitků jednoho druhu a to především ze slitin hliníku, hořčíku a zinku.

O tomto, v dnešní době, poměrně rozšířeném způsobu výroby lze hovořit při výrobě desetitisíc až statisíc kusů. Celá výroba musí být navržena dle správných technologických postupů odpovídajících této metodě a to za pomoci výrobních zařízení jakými jsou nejčastěji tavící a udržovací pece a především tlakové lící stroje spolu s širokou možností pomocných zařízení.

Úkolem mé diplomové práce je popsat metalurgický proces ve vysokotlaké slévárně hliníku a provést ověření možného vlivu druhu tavícího agregátu spolu s obsahem vsázky na naplynění taveniny prostřednictvím stupně naplynění tzv. DICHTE INDEXU.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

### 2.1 Charakteristika hliníku a slitin Al pro výrobu odlitků vysokotlakým litím [3]

**Aluminium** se řadí mezi kovy neželezného charakteru vyznačující se velmi nízkou měrnou hmotností. Je to kov stříbrolesklé barvy s významnou tepelnou i elektrickou vodivostí. Z důvodu poměrně nízkých mechanických vlastností, jakými jsou např. pevnost a mez průtažnosti se nemůže v technické praxi využívat přímo čistý hliník jako výrobní surovina. Pro bližší specifikaci vlastností čistého hliníku je uvedena tabulka 1.

Tabulka 1 Přehled vybraných vlastností hliníku

Vlastnosti	Hodnoty
Krystalická mřížka	K2
Parametr mřížky	$a = 0.404958 \text{ nm}$
Hustota	$2700 \text{ kg.m}^{-3} \text{ g.cm}^{-3} \text{ (pi } 20 \text{ } ^\circ\text{C)}$
Teplota tavení	$660.4 \text{ } ^\circ\text{C}$
Teplota varu	$2494 \text{ } ^\circ\text{C}$
Tepelná vodivost	$247 \text{ W.m}^{-1} \text{ (pi } 25 \text{ } ^\circ\text{C)}$
Elektrická vodivost	$62 \% \text{ IACS (Al } 99.8)$ $65 - 66 \% \text{ IACS (Al } 99.999+)$
Latentní teplo tavení	$397 \text{ kJ.kg}^{-1}$
Latentní teplo varu	$10.78 \text{ MJ.kg}^{-1}$
Atomová hmotnost	$26.98154$
Objemová změna při krystalizaci	$6.5 \%$
Měrná tepelná kapacita	$0.900 \text{ kJ/kg.K (pi } 25 \text{ } ^\circ\text{C)}$ $1.18 \text{ kJ/kg.K (pi } 660.4 \text{ } ^\circ\text{C)}$
Spalné teplo	$31.05 \text{ MJ/kg}$
Elektrický odpor	$26.2 \text{ n}\Omega\text{.m (Al } 99.999+ \text{ pi } 20 \text{ } ^\circ\text{C)}$ $26.55 \text{ n}\Omega\text{.m (Al } 99.8 \text{ pi } 20 \text{ } ^\circ\text{C)}$
Teplota supravodivosti	$1.2 \text{ K}$
Účinný průřez pro neutrony	$0.2 \text{ b/atom pro energii neutronu } 0.02 \text{ V}$ $0.65 \text{ /atom pro energii neutronu } 100$

Zdroj: [2]

## 2.1.1 Rozdělení slitin hliníku [3]

Jak už bylo zmíněno, tak v praxi se využívají výhradně slitiny hliníku. Výrobou jednotlivých slitin je možné dosáhnout materiálů, které ve výsledku svými vlastnostmi odpovídají konkrétnímu použití. Hlavní předností však zůstává nízká měrná hmotnost, dobrá elektrická i tepelná vodivost a v mnoha případech i korozní odolnost.

Dle [3] lze hliníkové slitiny rozdělit dle následujících kritérií:

a) Podle chemického složení

Jako nejčastější legura u hliníkových slitin se používá křemík, měď, zinek a hořčík, dále pak se v menším množství přidává mangan, nikl a jiné prvky. Ve většině případů je možné se setkat se slitinami Al – Cu – Mg, ale zejména Al – Si, takzvanými siluminy, které jsou důležité především pro výrobu odlitků vysokotlakým litím.

b) Podle způsobu zpracování slitiny

Zde se slitiny dělí na slitiny k tváření, kde přísadové prvky nedosahují eutektických obsahů.

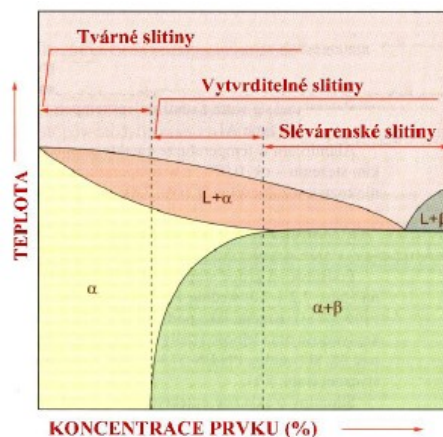
V této diplomové práci se však budeme zabývat především slitinami k odlévání, které se vyznačují vyšším obsahem přísadových prvků. To má za následek vznik eutektických nebo nadeutektických slitin.

c) Podle schopnosti k tepelnému zpracování

Přes možnost tepelného zpracování žíháním pro úpravu struktury, nikoliv však pevnosti je nejčastější rozdělení hliníkových slitin na tzv. vytvrditelné a nevytvrditelné. Schopnosti vytvrzování dosáhneme vhodnou kombinací některých prvků, a to zejména hliníku s mědí, hořčíkem, zinkem, křemíkem či niklem.

d) Podle odolnosti vůči chemickým vlivům

Samotnou odolnost hliníku vůči chemickým vlivům značně ovlivňuje legování jednotlivých slitin. Dle konkrétního způsobu lze dosáhnout odolnosti vůči konkrétním vlivům a naopak. Tím je možné provést rozdělení na slitiny hliníku podle odolností proti chemickým vlivům.



Obr. 1 Rozdělení hliníkových slitin [3]

Tato diplomová práce se zabývá výrobou odlitků vysokotlakým litím, proto se v dalších kapitolách bude mluvit již jen o slitinách slévarenských. Ty se vyznačují jistými a souhrnně nazývanými slévarenskými vlastnostmi, kam je možné např. zařadit slévatelnost, odolnost vůči vzniku trhlin za tepla, malý interval krystalizace. Dle [3] je právě slévatelnost ovlivněná teplotním intervalem krystalizace, viskozitou a povrchovým napětím taveniny. Odolnost vůči vzniku trhlin za tepla je tím nižší, čím má slitina větší interval krystalizace a nižší pevnostní vlastnosti za vyšších teplot. Pro schopnost vyrábět jednotlivé díly odléváním neboli vyplněním dutiny formy je velmi důležitá tzv. zabíhavost, neboli tekutost. Pro posouzení vhodnosti či případné nevhodnosti dané slitiny pro danou výrobu odlitků se zabíhavost zkouší několika metodami. Nejčastější je však lití do kokil, v níž je vytvořena dutina v podobě spirály. Dle délky odlité spirály se následně posoudí vhodnost zkoušeného materiálu. Mezi další zkoušky patří např. klínová či labyrintová zkouška zabíhavosti. Má-li se však dosáhnout srovnatelných výsledků, je nutné dodržet stejné podmínky, za kterých byla zkouška prováděna, tzn. teplota taveniny, jakost povrchu kokily atd.

Pokud by bylo požadavkem srovnat slévarenské slitiny hliníku se slévarenskými slitinami z jiných kovů, tak lze vyzdvihnout řadu výhod. Těmi dle [3] mohou být nízká teplota tavení, malý interval krystalizace, dobrá chemická stabilita, dobré povrchové vlastnosti odlitku a také obsah vodíku v odlitku, který je jediným rozpustným plynem v hliníku a ten lze vhodnými technologickými podmínkami minimalizovat.

## 2.1.2 Značení slitin hliníku na odlitky [1]

V současné době se v České republice nejčastěji používá označení slitin hliníku na odlitky dle evropské normy ČSN EN 1706, ovšem neméně často je ve slévárnách využíváno značení podle původní německé normy DIN 1725. Evropská norma ČSN EN 1706 využívá značení číselné nebo chemickými značkami.

### 1) Číselné značení

V tomto označení slitiny je použit tvar EN AC a pětímístné číslo, tedy: EN AC – XXXXX

První z pěti číslic charakterizuje hlavní přísadový prvek:

2 – slitiny Al - Cu

3 – slitiny Al – Si

4 – slitiny Al – Mg

5 – slitiny Al – Zn

Číslice na druhém místě udává skupinu slitin, třetí číslice je pořadové číslo ve skupině a koncové dvě číslice jsou nuly.

### 2) Značení chemickými značkami

I v tomto způsobu značení dle evropské normy ČSN EN 1706 označení začíná EN AC, ovšem za pomlčku se uvádí Al spolu s označením přísadových prvků, a to dle svého obsahového zastoupení ve slitině. V případě, že obsah prvku je vyšší než jedno procento, tak se za jeho chemickou značku uvede taktéž i jeho obsah v procentech. U prvků s obsahem nižším nežli jedno procento se jeho obsah v označení slitiny neuvádí.

Tab. 2 Možné označení vybraných slitin pro lití pod tlakem

Označení slitiny			Chemické složení [%]										
VDS	Číselné	Chemické	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
226	EN AC 46000	EN AC - AlSi9Cu3(Fe)	8,0- 11,0	1,3	2,0- 4,0	0,55	0,05- 0,55	0,15	0,55	1,2	0,35	0,25	0,25
231	EN AC 47100	EN AC - AlSi12Cu1(Fe)	10,5- 13,5	1,3	0,7- 1,2	0,55	0,35	0,10	0,3	0,55	0,20	0,10	0,20
239	EN AC 43400	EN AC - AlSi10Mg(Fe)	9,0- 11,0	1,0	0,10	0,55	0,2- 0,5		0,15	0,15	0,15	0,05	0,20
230	EN AC 44300	EN AC - AlSi12(Fe)	10,5- 13,5	1,0	0,10	0,55				0,15			0,15

Zdroj: [11]

## 2.1.3 Vlastnosti vybraných slitin pro lití pod tlakem [1]

### 1) Slitiny Al-Si-Cu

Zejména v automobilovém průmyslu, který v České republice zaujímá vysoký podíl na trhu, je tento typ slitin velmi rozšířený. Pro výrobu odlitků ze slitin hliníku litím pod tlakem je nejrozšířenější slitina AlSi9Cu3(Fe), což je slitina podeutektického (výjimečně až eutektického) složení. Právě měď ve slitině zlepšuje mechanické vlastnosti a obrobitelnost. Na druhou stranu hliníkovým slitinám zhoršuje odolnost proti korozi, a však ta ve zmíněném automobilovém průmyslu dostačuje.

Měď zde vytváří také jistý stupeň samovolného vytvrzování, který roste s rychlostí ochlazování odlitků při tuhnutí, kdy vzniká přesycený tuhý roztok  $\alpha(\text{Al})$ . Díky výše uvedenému se odlitky z této slitiny využívají bez tepelného zpracování, přičemž výsledné vlastnosti odlitek získá po několika dnech samovolného vytvrzování.

Dle [1] lze vybrané vlastnosti slitin Al-Si-Cu charakterizovat takto:

**Slévárenské vlastnosti** – Přísada mědi ve slitinách Al-Si poněkud zmenšuje stahování kovu při tuhnutí a zlepšuje nepropustnost odlitků.

Uvádí se rovněž, že se mírně zmenšuje naplynění taveniny. Měď tvoří ve slitině ternární eutektikum, které tuhne až v samotném závěru. Za přítomnosti mědi a hořčíku vznikají různá vícesložková eutektika s teplotami tuhnutí až pod 500°C.

**Mechanické vlastnosti** – Přísada mědi vždy významně zvyšuje pevnost slitin Al-Si v litém stavu, snižují se však plastické vlastnosti. Tento vliv se dále zvětšuje za přítomnosti hořčíku a zinku. Vlivem samovolného vytvrzování odlitky získávají svoje konečné mechanické vlastnosti až po několika dnech.

**Obrobitelnost** – se přísadou mědi velmi výrazně zlepšuje. Třísky jsou dobře lámavé a dosahuje se kvalitního povrchu.

**Odolnost proti korozi** – měď má negativní vliv na odolnost proti korozi v kyselinách, alkalických roztocích a v mořské vodě. V množství několika desetin procenta se korozní odolnost v atmosférických podmínkách ještě příliš nezhoršuje, při obsahu asi nad 2% Cu je již poměrně špatná a doporučuje se používat nějaký způsob povrchové ochrany, např. nátěry.

**Povrchová úprava** – vlivem mědi se zlepšuje kvalita povrchu po broušení a leštění. Při obsahu nad 0,5% měď zhoršuje možnost anodické oxidace, neboť se zmenšuje tloušťka a hutnost ochranné vrstvy. Povrch je matný a má nestejněměrný vzhled. Pro účely zvýšení odolnosti proti otěru je však anodickou oxidací možno použít.

## 2) Slitiny Al-Si-Mg

Stejně tak jako předcházející skupina slitin hliníku i tato je hojně využívána v automobilovém a často i v leteckém průmyslu, a však tentokrát díky vlastnostem získaných po vytvrzování. U těchto slitin bývá obsah hořčíku nejčastěji 0,25 – 0,45%, což umožní vytvrzování za tepla, bez něhož má slitina jen průměrné mechanické vlastnosti.

Slitiny jsou podeutektické, kdy se stoupajícím obsahem křemíku vzrůstají také slévárenské vlastnosti a svařitelnost.

Například slitinu AlSi10Mg lze podle [1] popsat takto:

**Charakteristika** – Mírně podeutektické slitiny s nízkým obsahem doprovodných prvků a nečistot, s výbornými slévárenskými a technologickými vlastnostmi. Velmi dobrá obrobiteľnosť a odolnosť proti korozi.

**Tepelné zpracování** – Používá se ve stavu vytvrzeném, rozpouštěcí žíhání 510-525°C – 3-6 hod./ ochlazení ve vodě / precipitační žíhání 150-175°C – 5-15 hod.

**Použití** – Tenkostěnné, tvarově složité odlitky s vysokými nároky na pevnost a houževnatost, např. vysoce namáhané strojní součástky, díly motorů, klikové skříně, brzdové čelisti, rychloběžné součástky, např. pro ventilátory.

## 2.1.4 Vybrané přísadové prvky ve slitinách Al-Si [1]

### Křemík Si

Tento prvek zlepšuje většinu slévárenských vlastností a zužuje interval tuhnutí, proto je považován za základní přísadový prvek hliníkových slitin.

Jeho zvyšující se obsah ve slitině má vliv zejména na:

- 1) zvýšení zabíhavosti,
- 2) snížení součinitele stahování během tuhnutí a sklonu ke vzniku mikrostaženin,
- 3) zlepšující se kluzné vlastnosti a odolnost proti otěru,
- 4) zmenšení tepelné roztažnosti,
- 5) zvýšení korozní odolnosti.

Nelze však uvažovat zvyšující se pevnost či tažnost.



## Měď Cu

Velmi často používaným prvkem, který značně rozšiřuje interval tuhnutí, což může mít za následek vznik ředin a trhlin za tepla. Nejběžnější obsah tohoto prvku bývá do 5%. Svou přítomností ve slitině zvyšuje pevnost a tvrdost, přičemž lze říci, že se zároveň snižuje tažnost a zhoršuje se korozní odolnost. Díky krátké a snadno lámavé třísce spolu s kvalitním a hladkým povrchem lze tento prvek označit jako zlepšující obrobiteľnost.

## Hořčík Mg

Obsah hořčíku pohybující se v obsahu 0,3 – 0,7% tvoří významnou roli při vytvrzování za tepla. Ve zmíněném množství prakticky neovlivňuje slévárenské vlastnosti, a však se zvyšujícím se množstvím roste pevnost, které je možno dosáhnout po vytvrzování za tepla.

Dle [1] tvoří hořčík v litém stavu intermetalickou fází  $Mg_2Si$ , která tvoří eutektikum Al-Si- $Mg_2Si$  s teplotou tuhnutí asi  $555^{\circ}C$  tvořící ve struktuře drobné kostrovité útvary. Vzhledem k vysoké rozpustnosti hořčíku v Al se částice  $Mg_2Si$  při homogenizačním žhání zcela rozpustí.

Přednostně tvoří fáze s mědí. Pokud ovšem není měď ve slitině obsažena, reaguje s železem a tvoří eutektikum s teplotou tuhnutí  $554^{\circ}C$ .

## Železo Fe

Důsledkem poměrně nízké rozpustnosti v tuhém hliníku vytváří intermetalické fáze a to již při malém obsahu, a to zejména jehlicovitou fází  $Al_5FeSi$  označovanou jako fáze  $\beta-AlFeSi$  a tvarově více kompaktní fází  $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ , často známou pod označením „čínské písmo, rybí kost“, nebo-li  $\alpha-AlFeMnSi$ .

Uvedená fáze  $\beta-AlFeSi$  vzniká před vyloučením lamel křemíku a tvoří hrubé deskovité útvary porušující strukturu siluminu, čímž výrazně zhoršuje jeho vlastnosti.

Naopak zmíněná více kompaktní fáze  $\alpha-AlFeMnSi$  vzniká zejména za přítomnosti manganu.

Díky vznikajícím intermetalickým fázím se železo považuje obecně za škodlivý prvek, proto se u běžných odlitků připouští jeho obsah do 0,6%. Ovšem při tlakovém lití se využívá jeho vlastnosti snižování lepení kovu na

formu, čímž značně prodloužíme její životnost. Proto se u tohoto způsobu odlévání používají slitiny s obsahem železa blížící se 1%, přičemž jeho škodlivý vliv se kompenzuje právě manganem, jehož množství ve slitině se doporučuje zhruba 50% obsahu železa.

### **Mangan Mn**

Z popisu charakteristiky předchozích prvků ve slitinách hliníku je patrné, že hlavním úkolem manganu je kompenzovat nepříznivý vliv železa. Manganem lze upravit nepříznivou morfologii železa, kdy více škodlivou fází  $\beta$  mění na kompaktní fází  $\alpha$ . Ačkoli samostatně nemá Mn ve slitinách Al významný vliv, tak díky zmírnění škodlivých vlastností železa lze říci, že zvyšuje mechanické vlastnosti a snižuje křehkost.

## **2.2. Příprava taveniny slitin Al pro vysokotlaké lití [2]**

Celý metalurgický proces přípravy slitin hliníku pro výrobu odlitků vysokotlakým litím je do určité míry specifický a odlišný například od metalurgického procesu během přípravy taveniny slitin hliníku pro odlitky vyráběné gravitačním litím. Možným specifikem je zde fakt, že během přípravy taveniny v naprosté většině sléváren neprobíhá tzv. modifikace ani očkování taveniny, přestože jsou takové postupy známe. Účinky těchto dvou operací nám v dostačující formě poskytne způsob odlévání. Tím je lití do kovových forem, což nám především zajistí strmou křivku chladnutí a lití pod velkým tlakem za působení tzv. dotlaku.

Tavení hliníkových slitin je velmi energeticky náročné, proto je výhodné mít tavicí kapacitu co nejbližší u kapacity výrobní. Přes známé případy, kdy se tekutý kov do sléváren dováží pomocí nákladních automobilů se speciálními tepelně izolovanými nádobami je nejobvyklejší způsob tavení hliníkových slitin ve vlastních tavicích agregátech, které jsou součástí slévárny, kam je slitina dovážena v podobě ingotů neboli tzv. housek viz obr. 2. Takto dopravený materiál je primární surovinou při výrobě taveniny pro výrobu odlitků vysokotlakým způsobem.



Obr. 2 Vstupní surovina v podobě housek [8]

## 2.2.1 Tavení [1]

Jak již bylo uvedeno, tak tavení hliníkových slitin je důsledkem své vysoké vodivosti velmi energeticky náročné a tento fakt musí být zohledněn v ekonomických analýzách každé slévárny hliníku.

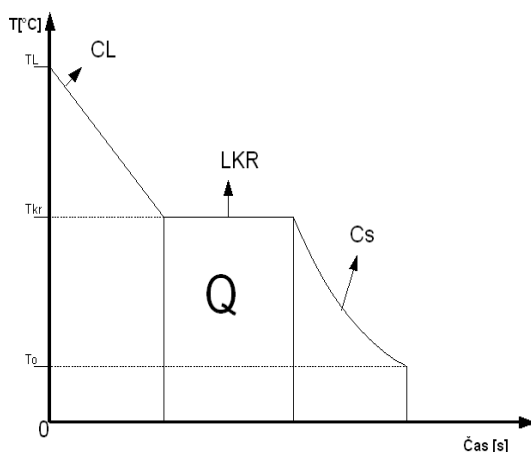
Toto tvrzení lze deklarovat následným teoretickým výpočtem, kdy je porovnáváno množství tepla potřebné pro natavení 1kg čistého hliníku a 1kg litiny s lupínkovým grafitem.

Toto ověření bylo provedeno dle vztahu:

$$Q = m [C_L (T_l - T_{kr}) + L_{KR} + C_S (T_{kr} - T_{ok})]$$

kde značí:

- Q množství tepla potřebného k roztavení 1kg čistého hliníku [J];
- m hmotnost taveného materiálu [kg];
- $c_L$  měrnou tepelnou kapacitu v kapalném stavu [ $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ];
- $c_S$  měrnou tepelnou kapacitu v tuhém stavu [ $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ];
- $L_{KR}$  latentní teplo tavení [ $J \cdot Kg^{-1}$ ]
- $T_l$  teplotu lití [ $^{\circ}C$ ]
- $T_{kr}$  teplotu krystalizace [ $^{\circ}C$ ]
- $T_{ok}$  teplotu okolí [ $^{\circ}C$ ]



Obr. 3 Schéma křivky chladnutí čistého kovu

1) hodnoty pro čistý hliník

$$m = 1 \text{ [kg]}$$

$$c_L = 1289,5 \text{ [J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

$$c_S = 1289,5 \text{ [J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

$$LKR = 397\,163 \text{ [J} \cdot \text{Kg}^{-1}\text{]}$$

$$T_l = 720 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{kr} = 660 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{ok} = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q = 1 \cdot [1289,5 \cdot (720 - 660) + 397163 + 1289,5 \cdot (660 - 20)] = 1047973 \text{ J}$$

2) hodnoty pro litinu s lupínkovým grafitem

$$m = 1 \text{ [kg]}$$

$$c_L = 729,0 \text{ [J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

$$c_S = 544,2 \text{ [J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

$$LKR = 299\,200 \text{ [J} \cdot \text{Kg}^{-1}\text{]}$$

$$T_l = 1300 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{kr} = 1147 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{ok} = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q = 1 \cdot [729 \cdot (1300 - 1147) + 299200 + 544,2 \cdot (1147 - 20)] = 1024050,4 \text{ J}$$

Přesto, že by se mohlo zdát, že jsou porovnávány dva naprosto odlišné materiály, a to zejména z pohledu teploty tavení, tak teplo potřebné pro natavení 1kg čistého hliníku a litiny s lupínkovým grafitem je velmi srovnatelné, z čehož vyplývá výše uvedená energetická náročnost tavení hliníkových slitin.

Ve většině vysokotlakých sléváren slitin hliníku jsou hlavní technologií pro přípravu taveniny pece tavící a pece udržovací.

Tavící pece slouží především k roztavení tuhé vsázky, kterou tvoří vstupní slitina spolu se zpětným materiálem z výroby. Tím můžou být např. vtokové soustavy, vlnovce či odlitky nevyhovující předepsaným vlastnostem označované jako zmetky.

V těchto pecích se tedy dosahuje teploty vyšší než teploty tání příslušné slitiny. Dle zavedených technologických postupů je přímo v těchto pecích možné provádět jisté metalurgické operace, jakými mohou být např. odplyňování a rafinace. Při vylévání tekutého kovu z tavících pecí je dle potřeby možné využít keramických filtrů.

Pece udržovací jsou zařízení umístěná přímo u tlakového licího stroje, odkud je přes komoru do formy nadávkováno (strojně nebo ručně) určité množství tekutého kovu. Hlavním úkolem těchto pecí je především zajistit konstantní teplotu kovu, která musí odpovídat licí teplotě příslušné slitiny k příslušnému odlitku. Jelikož ve slévárnách hliníku zabývající se litím vysokotlakým způsobem není příliš obvyklé provádět metalurgické operace, jakými jsou např. očkování a modifikace, tak se již v udržovacích pecích většinou žádné zásadní úpravy taveniny neprovádějí.

Doplňujícím zařízením výše uvedených bývají často velkoobjemové udržovací pece, ze kterých se kov rozváží do pecích udržovacích u licích strojů. Tyto pece však již nemusí být umístěny v bezprostřední blízkosti tlakových licích strojů. Jejich hlavní význam spočívá především v uchování většího množství nataveného kovu, čímž je možné krátkodobě dosáhnout na

tlakových strojích vyššího odběru tekutého kovu, nežli dovoluje tavící kapacita tavících pecí. Dalším významem těchto zařízení je homogenizace a stabilizace vlastností taveniny.

V prostředích malých sléváren především s technologií odlévání do pískových forem se používá tzv. systém jedné pece. V těchto pecích se provede samotné natavení kovu a stejně tak i veškeré potřebné metalurgické operace. Obvykle se přímo z těchto tavících agregátů odlévá do připravených forem.

### **2.2.2 Požadavky na tavící pece [1]**

Obecně lze zformulovat některé zásady, které by měly být zajištěny u tavících i udržovacích pecí z hlediska kvality kovu:

- 1) malá oxidace a naplynění kovu,
- 2) oddělení tekutého kovu od pevné vsázky,
- 3) zamezení místního přehřívání taveniny.

Vzhledem k vysoké afinitě hliníku ke kyslíku je právě oxidace předním problémem tavení a odlévání hliníkových slitin. Ovlivňujícím parametrem oxidace je především chemický charakter atmosféry v peci, kde je snahou využívat mírně redukční prostředí plynových ohřevů. Z výše uvedeného je třeba klást důraz na zbytečné neporušování lidické vrstvy na hladině taveniny. K jejímu porušení dochází především při nevhodném proudění taveniny a především při jejím turbulentním proudění, což má za následek další oxidaci. Z tohoto důvodu je v provozu třeba zvážit nutnost vylévání a přelévání tekutého kovu, aby nedocházelo ke zbytečnému víření taveniny.

Významným ekonomickým hlediskem tavící pece je tzv. propal, který je důsledkem oxidace.

S oxidací souvisí i další ekonomicky nepříjemný produkt, který se nazývá stěry. Stěry jsou oxidy na hladině, popř. oxidy, které se důsledkem rafinace

oddělují od tekutého kovu a jsou vynášeny na hladinu. Celý proces rafinace, např. pomocí rafinačních solí je popsán v následujících kapitolách této práce. Důležité je uvést, že stěry jsou pro slévárnu hliníku vždy velkou finanční ztrátou. Stěry nelze přímo ve slévárnách zpracovávat, a proto se musí prodávat do hutí. Jejich obtížné zpracování pro slévárny spočívá především v nutnosti tavení stěrů na vysoké teploty, na které není vybavena.

S výše uvedeným úskalím hliníkových slitin je také jednoznačně spojeno tzv. naplynění taveniny, které závisí na styku nataveného kovu s jakoukoli formou vlhkosti, která může být obsažena např. v pecní atmosféře. Z tohoto pohledu je dobré, když nedochází ke styku kovu se spaliny nebo jinou formou vlhkosti např. na vsázeném materiálu. Na základě této problematiky lze za výhodné označit tavící pece kelímkové, kde se při jejich provozu taví bez dosazování. Pokud je však vsázka nutné vsadit, je třeba dbát na dokonalé přehřátí a vysušení materiálu.

V souvislosti s těmito poznatky je nepřipustné, aby se tavící pec doplňovala vhozením studených surovin přímo do lázně roztaveného kovu. Aby bylo zabráněno tomuto technologicky nepřipustnému postupu, tak jsou doporučovány tavící pece šachtové. V těchto tavících agregátech je tekutý kov oddělen od pevné tavené vsázky.

U těchto pecí je třeba zdůraznit i značný efekt ekonomický, kdy je využíváno přehřívání vsazených surovin. Dle [1] vsázka přehřívá na 300°C vnáší do systému asi 20% celkového tepla roztaveného kovu.

Mezi požadavky na tavící pece lze zařadit i negativní vliv místního přehřívání kovu, kde jeho důsledkem je vyšší stupeň naplynění tekutého kovu a vznik vměstků. Toto nebezpečí hrozí především u kelímkových pecí, kde vlivem špatného seřízení dochází k jednostrannému ohřevu.

## **2.2.3. Tavicí agregáty [1], [4], [7]**

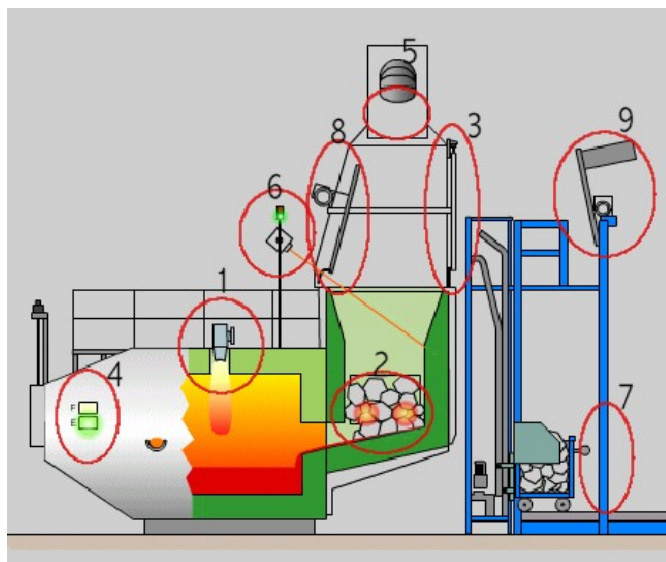
### **2.2.3.1 Šachtové pece**

Šachtové pece jsou známé a především využívané pro jejich schopnost efektivně využít odpadní teplo k předeřhřevu vsázky. Teplo, které vzniká při tavení vsázky, ale i při udržování již nataveného kovu odchází přes šachtu, do které je zavážen materiál. V šachtě tedy dochází ke zmíněnému předeřhřevu vsázky, což je neopomenutelný aspekt pro ekonomickou stránku celého tavení, ale zároveň se zde odpařuje vlhkost a vyhořívají případné organické nečistoty. Princip provozu šachtové pece je zobrazen na obr. 4, kde je vidět rozdělení pece na tavicí a udržovací část, popř. ještě šachtu kudy je materiál vsázen do pece. Součástí těchto typů pecí je zavážecí zařízení, s jehož pomocí se dopravuje materiál k tavení.

Nejčastěji se u těchto tavicích agregátů využívá zemního plynu, jako topného média. U menších pecí se používá jeden hořák, ovšem běžnější variantou je použití hořáků pro udržování již nataveného kovu a samostatných hořáků pro tavení tuhé vsázky. Oba prostory, tavicí a udržovací, jsou propojené a natavený kov přetéká do udržovací části. Vnitřní prostor pecí je vyzděn z žáruvzdorných materiálů a opatřen izolační vrstvou, aby docházelo k co nejmenším ztrátám tepla.

Důsledkem toho, že se nemůže vlhký či znečištěný materiál dostat přímo do roztaveného kovu je získání kovu o vysoké čistotě a především o nízkém stupni naplynění, což bude ověřeno v praktické části této diplomové práce. V případě potřeby provedení příslušných metalurgických operací je kov snadno přístupný po otevření čistících dveří. Dle autora [1] bývá propal u těchto pecí velmi nízký, řádově 1 – 2%. Využívají se především pro větší tavicí výkony a zásobu nataveného kovu.





Obr. 4 Schéma šachtové pece [12]

- 1) udržovací hořák,
- 2) tavící hořák,
- 3) zavážecí otvor,
- 4) elektrody hlídající stav naplnění taveninou,
- 5) termočlánek spalin,
- 6) laser hlídající stav naplnění šachty,
- 7) zavážení,
- 8) poklop šachty pro udržovací režim,
- 9) montážní plošina.

Z celkových a investičních nákladů je 95% vynaloženo na energie, ztrátu kovu a údržbu. Proto přední výrobci na trhu prakticky neustále představují výsledky svých výzkumů, na základě kterých se zdokonalují nosné konstrukce, životnost a izolační schopnost vyzdívky, nízká spotřeba topného média, či doplňkové vybavení. Tím mohou být např. tenzometrické buňky spolu s laserem sledující stav naplnění šachty, což umožní dokonalý monitoring provozu tavícího agregátu a stejně tak jeho obsluhy a maximální

využitý tepelné energie na předehřev vždy maximálního množství vsázky. Výsledkem takového sledování může být přesné složení vsázky ve smyslu poměru housek ku vratu, hodnoty tzv. propalu, spotřeby plynu na jednu natavenou tunu nebo dohled nad správným čištěním pece. Všechny tyto hodnoty nám pomáhají optimalizovat celý proces tavení, který vede k lepším kvalitativním a především ekonomickým výsledkům celého procesu ve vysokotlaké slévárně slitin hliníku.



Obr. 5 Šachtová pec [6]

Jak už bylo zmíněno, je velmi důležité věnovat pozornost údržbě pece. Správným technologickým postupem a čištěním tavicího i udržovacího prostoru od oxidů dojde k značnému prodloužení životnosti vyzdívky pece, což představuje často úsporu v řádech desítek tisíc eur při opravách a nemalé úspory na samotnou odstávku pece, která ve většině případů musí být až v řádech týdnů. A to zejména z důvodu dlouhého chladnutí pece po jejím odstavení, ale především z důvodu sintrace, neboli nahřívání pece na provozní teplotu, které po zhotovení nové vyzdívky bývá až několik dní. Při uvážení velikosti šachtových pecí bývá odstávka těchto strategických tavicích kapacit velmi problematická a nákladná.

### 2.2.3.2 KELÍMKOVÉ PECE

Využití tohoto typu pecí je především při tavení menšího objemu kovu. Jistou výhodou je poměrně velká flexibilita v možnostech změny tavené slitiny.

V zásadě se do kelímkových pecí používají dva typy tavících kelímků, a to tzv. jílografitové a stále více oblíbené kelímky z SiC. I konstrukce těchto pecí bývá ve dvojím provedení. Jedním z nich je vyjímání celého kelímku po natavení a jeho současné použití jako transportní pánve a především u větších objemů, se tavící pec vyklápí, aby byl kov vylit do transportní pánve. Velikost kelímků se může pohybovat od 100 do 1000kg tavené hliníkové slitiny.

Pro používání tavících kelímků lze dle [1] zdůraznit určitá pravidla:

- 1) Nový kelímek má být dobře vysušen,
- 2) Ohřev kelímku se nemá provádět tepelným šokem,
- 3) Nedoporučuje se tavit kov, který předtím v kelímku ztuhl – ztuhlý kov se při ohřevu roztahuje a může způsobit prasknutí kelímku,
- 4) Při plnění vsázkou by na kelímek neměly působit prudké nárazy,
- 5) V plamenných pecích je nutno dbát na správné seřízení hořáků.

Jestliže jsou výše uvedené body dodržovány, lze životnost kelímků počítat řádově ve stovkách taveb.

Kelímkové pece bývají nejčastěji vytápěné zemním plynem nebo bývají elektrické odporové. U elektrických pecí je uváděna výhoda zamezení styku taveniny se spaliny, z nichž by mohla pohlcovat vlhkost.

V závěru praktické části této práce bude na základě měření a dosažených výsledků zhodnoceno, zda výše uvedené kladné a záporné vlastnosti tohoto tavícího agregátu lze považovat za zavazující nebo zda je možné díky vhodným metalurgickým operacím tyto vlastnosti považovat za druhotné, které nám neovlivní konečnou kvalitu taveniny.



a)



b)

Obr. 6 Kelímkové tavící pece [8]

a) Elektrická odporová kelímková pec

b) Plynová kelímková pec

Na tavící kelímky jsou kladeny vysoké nároky:

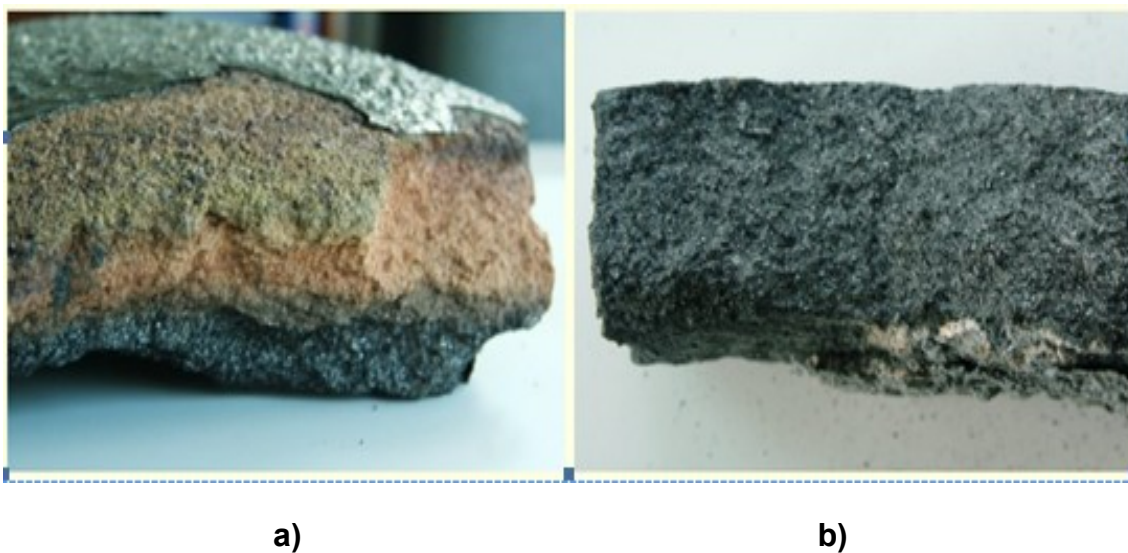
- 1) vysoké teploty, které jsou pro tavení kovu potřebné,
- 2) rozdílné způsoby ohřevu,
- 3) vysoké mechanické zatížení při vsazení vstupního materiálu, popř. při přepravě kelímku,
- 4) vysoké zatížení častou změnou teploty,
- 5) chemická odolnost vůči metalurgickým přípravkům.

Jak už bylo zmíněno, tak se často používají kelímky jílografitové. Směs pro výrobu takového kelímku se získá přidáním 30-50% grafitu, 10-20% SiC a určitého množství vody do jílu. Tavící kelímek je poté izostaticky lisován, čímž také potlačíme nižší tepelnou vodivost jílu. Po nanesení 2-3 vrstev glazury je kelímek vypalován v peci.

Výhodou těchto kelímku je nižší cena díky nízké ceně jílu a krátké době vypalování.

Nevýhodou je rychlé snížení tepelné vodivosti po vyhoření grafitu, protože grafit není v jílu vázán a glazura je pouze povrchová a na kelímku nemá dlouhou životnost. Pokud glazura přestane chránit povrch kelímku nebo dojde k jejímu poškození, urychlí se již zmíněné vyhořívání grafitu spolu se snižováním tepelné vodivosti, což má za následek prodloužení doby tavby a zvýše nákladů na tavení.

Stále častěji se ovšem používají tavící kelímky z SiC, které neobsahují žádný jíl. Směs pro výrobu je tvořena 30-45% grafitu, 40-60% SiC a syntetickou pryskyřicí bez příměsi vody. Po izostatickém lisování následuje dvacetidenní proces karbonizace v redukční atmosféře, kdy se vytváří uhlíková vazba mezi grafitem a SiC. Grafit tedy již není volně uložen, ale je pevně vázán na SiC. Dále následuje hloubková impregnace. Z důvodu dvacetidenního tepelného zpracování a vstupním surovinám je cena takového kelímku ve srovnání s jílografitovým asi o 20-30% vyšší. Získáváme ale výrazně vyšší tepelnou vodivost, která je navíc díky pevné uhlíkové vazbě a hloubkové impregnaci po celou životnost relativně stejná. Tento fakt je pro tavírny, resp. celé slévárny slitin hliníku významným ekonomickým parametrem, a to především z důvodu velké energetické tavící náročnosti hliníkových slitin, tak jak je uvedeno a znázorněno v kapitole 2.2.1, která je věnována samotnému tavení tohoto neželezného kovu.



Obr. 7 Srovnání jílografitového a SiC kelímku [5]



Na obr. 7 lze vidět srovnání struktury jílografitového a SiC tavícího kelímku po třech měsících provozu ve stejné peci. Na obr. 7a) je uveden řez jílografitovým kelímkem po třech měsících provozu, kde je viditelný úbytek vyhořelého grafitu, což má za následek již zmiňované negativní změny vlastností. Oproti tomu na pravé fotografii je vidět zachování grafitu uvnitř materiálu při použití SiC směsi, čímž si kelímek zachovává své vlastnosti a značně se tím prodlužuje jeho životnost.

Dalším velmi důležitým bodem je správná instalace tavícího kelímku do pece. Po kontrole stavu vyzdívky v peci a přezkoušení správného nastavení plamene z hořáku vsadíme kelímek do pece pomocí úchytných přípravků, většinou za použití jeřábu. Je třeba dbát na to, aby byl kelímek usazen na speciálně upravenou podložku, která musí být ze stejného materiálu jako samotný kelímek viz obr. 8 a stejného rozměru jako dno instalovaného kelímku. Při identickém materiálovém složení a rozměru kelímku s podložkou je zajištěna stejná tepelná roztažnost při ohřevu a není tak zde riziko poškození jednoho či druhého prvku za vzniku trhlin.



a)

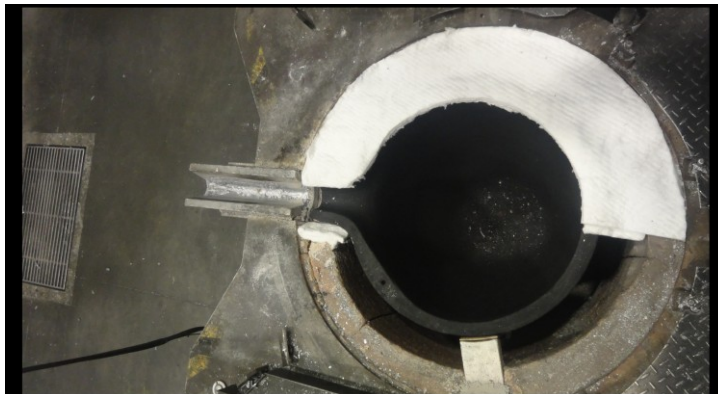


b)

Obr. 8 Tavící kelímky [8]

V případě, kdy se jedná o sklopnou kelímkovou pec, musí být podložka opatřena tzv. zámkem, kterému odpovídá vnější vybrání dna kelímku, což bývá ve slévárnách často využívanou možností. Druhou variantou by mohlo být slepení obou součástí, to ovšem přináší další náklady na speciální lepicí tmely, zručnost pracovníka a především čas na samotné slepení. Z důvodu

celkové tepelné roztažnosti se musí také vymežit určitý prostor mezi kelímkem a obvodovou stěnou pece viz obr. 9.



Obr. 9 Instalovaný tavící kelímek do plynové pece [8]

Správně usazený kelímek má vliv na samotný proces tavení, kdy je zapotřebí, aby byl plamen z hořáku správně nasměrován a tangenciálně „obtáčet“ celý kelímek až ke spalinovodu jak je zobrazeno na obr. 11.

Čerstvě vyzdění pece se nesmí osazovat novými kelímkami, protože uvolňovaná vlhkost ovlivňuje kvalitu kelímku a to z důvodu jejich hygroskopického povrchu, kdy vážou vzdušnou vlhkost. V takových případech musíme pec nejprve vysušit malým plamenem. Na obr. 10 je znázorněna instalace tavícího kelímku do odporové kelímkové pece.

Všechny kelímky, které jsou nově nainstalovány se musí ohřívat v prázdném stavu a za použití příslušných ohřívacích křivek.

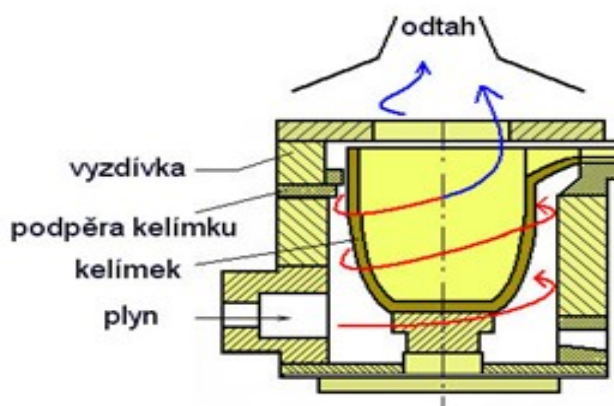


Obr. 10 Instalace tavícího kelímku do elektrické odporové pece [8]

Správně nainstalované a vyhřáté kelímky mají být nejprve naplněny houskami, které nesmějí být vloženy příliš těsně, jelikož se kov při ohřevu roztahuje rychleji a více než kelímek a ten pak může prasknout. Když je vytvořena kovová břečka, může se vsadit vratný materiál.

Z bezpečnostních důvodů musí být vsázka zcela suchá, jinak vzniká nebezpečí exploze. To je v důsledku významného zvětšení objemu, který voda zaujme při přechodu do plynného skupenství.

Primárně nikdy nenecháváme kov uvnitř kelímků zatuhnout. Pokud však má zbytek materiálu v kelímku zatuhnout, pak je třeba kelímek nechat zchladnout v šikmé poloze, aby se materiál opět nahřátí mohl roztahovat nahoru do volného prostoru.



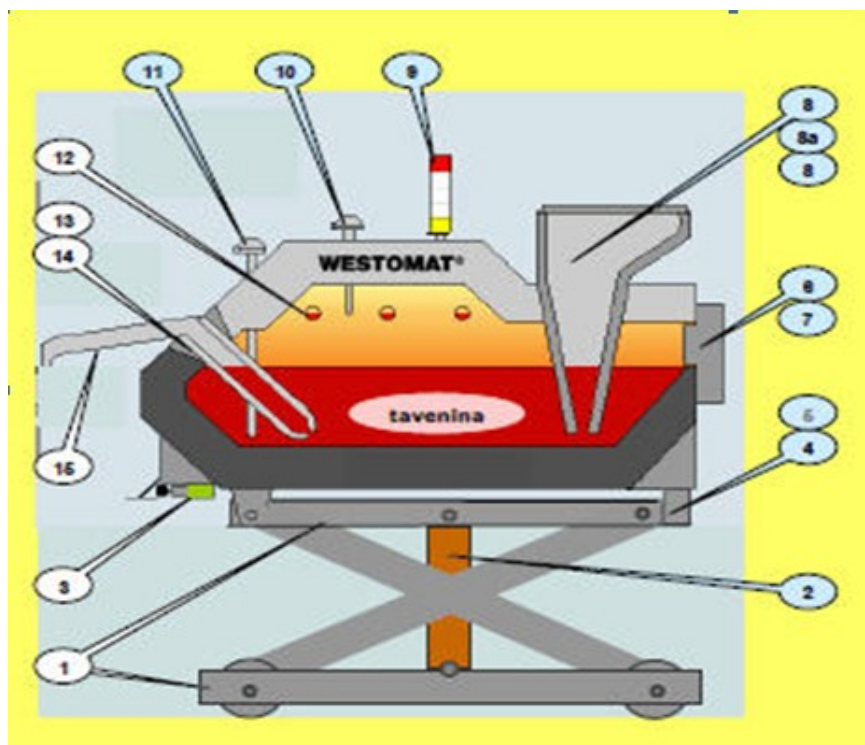
Obr. 11 Schéma plynové kelímkové pece [6]

### 2.2.3.3 DÁVKOVACÍ PECE

Dávkovací pece jsou umístěny přímo u tlakového lícího stroje a zajišťují správnou lící teplotu a především přesné množství dávkovaného kovu. Konstantní lící teplota bývá udržována pomocí topných SiC článků, které jsou umístěny ve stropu pece nad hladinou taveniny, a je nepřetržitě ověřována termočlánkem, který je ponořen do roztaveného kovu. Natavený materiál se nejčastěji transportní pávní nalije plnicím trychtýřem přímo do pece. Množství dávkovaného kovu je řešeno zvýšením tlaku na hladinu kovu v peci, kdy se přesné množství vytlačí přes dávkovací trubici do komory u tlakového lícího stroje, kde je následně pohybem pístu vtlačen do dutiny kovové formy.



Důležitým parametrem je tedy velikost působícího tlaku a čas po který tlak působí. Z výše uvedeného vyplývá, že je nutné zajistit těsnost celého systému.



Obr. 12 Schéma a popis dávkovácí pece [7]

- 1) klopný a zvedací podstavec,
- 2) hydraulický válec,
- 3) koncová poloha – pec v dávkovací poloze,
- 4) blok,
- 5) váhová buňka,
- 6) dvířka k čištění,
- 7) magnetický zámek,
- 8) doplňovací zařízení,
- 8a) doplňovací trubice,
- 8b) doplňovací trychtýř s víkem,
- 9) indikace stavu naplnění pece,
- 10) termočlánek prostoru pece,
- 11) termočlánek taveniny,
- 12) topná tělesa,
- 13) dávkovací kontakt,
- 14) dávkovací trubka,
- 15) přívodní žlab.

Pro správnou funkci dávkovací pece je potřeba klást důraz na pravidelné čištění pece od oxidů, aby se neusazovaly zejména v prostoru pod tzv. dávkovací trubicí. Zde by mohly nečistoty dávkovací trubici ucpávat a nedocházelo by ke správnému nadávkování kovu do komory lícího stroje.

Druhým velmi důležitým parametrem je těsnost pece, což umožní dosažení správného tlaku v peci, který působí na hladinu taveniny uvnitř komory a vytlačí slitinu do dávkovací trubice.

Dodržováním těchto dvou důležitých kroků se dosáhne správné funkce celého zařízení a tím i bezproblémové a přesné výroby, ale především nebude docházet k narůstání korundu na vyzdívce uvnitř pece. V situacích, kdy dojde k značnému růstu korundu na vyzdívce, tak jak je vidět na fotografiích, je často jediným řešením vybourání a zhotovení nové vyzdívky pece, což bývá finančně velmi nákladné.



Obr. 13 Zanedbaná dávkovací pec s již viditelnými nárůsty korundu [8]



Obr. 14 Správně vypadající vyzdívka dávkovací pece bez nárůstu korundu [8]

## 2.2.4 Naplynění hliníkových slitin [1], [4]

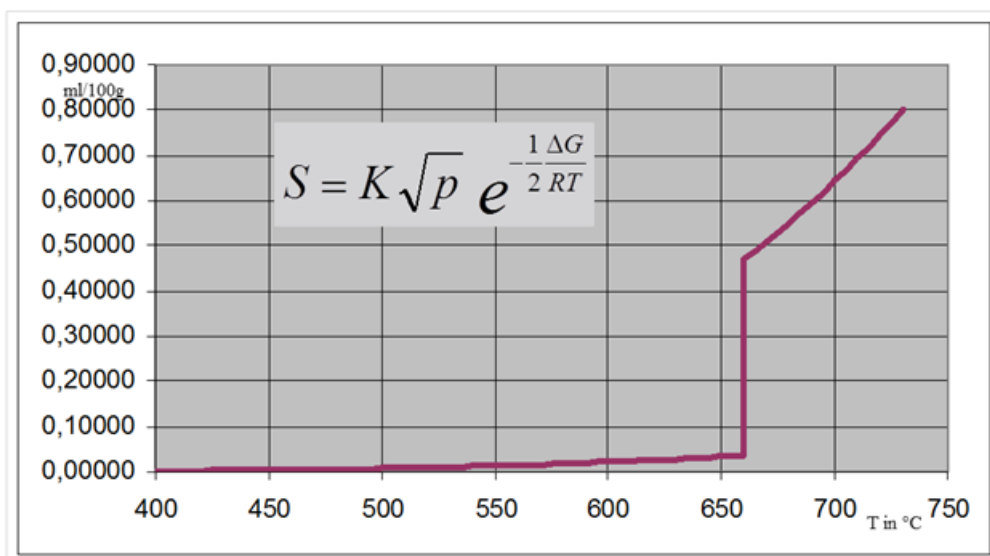
V této diplomové práci byla již uvedena celá řada vlastností hliníkových slitin, pro které je tento materiál využíván ve stále větším množství v celé škále průmyslových odvětví.

Nemůžeme však opomenout jeho naopak velký nedostatek, čímž je velká náchylnost ke vzniku pórovitosti. Tato nepříznivá vlastnost může mít za následek zhoršení mechanických vlastností a těsnosti odlitků ze slitin hliníku.

Právě pórovitost nebo také porezita vzniká v důsledku prudce klesající rozpustnosti vodíku ve slitině při jejím tuhnutí. Závislost obsahu vodíku na teplotě je znázorněna na obr. 15. Dle [1] a [5] se při každém zvýšení teploty o 110 K rozpustnost vodíku v tavenině přibližně zdvojnásobuje. Z tohoto důvodu se klade důraz na to, aby nedocházelo ke zbytečnému přehřívání taveniny, což by vedlo k významnému zvýšení pórovitosti odlitků.

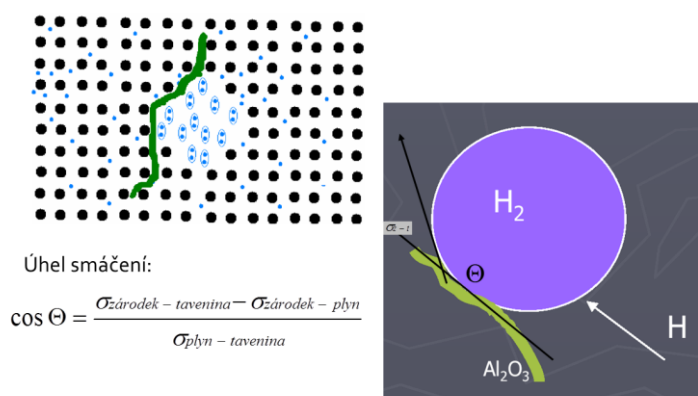
Dle obr.15 může tavenina obsahovat množství vodíku jen odpovídající znázorněné křivce při dané teplotě. Při překročení meze rozpustnosti vodík z taveniny uniká difuzí nebo ve formě plynových bublin. Vznik samotných plynových bublin je možný dvojím mechanismem, a to homogenní nebo heterogenní nukleací. Přičemž pro vznik homogenní nukleace bublin je podstatný poměr tlaku uvnitř bubliny vůči součtu tlaků metalostatického, atmosférického a tlaku povrchového napětí. Je třeba zdůraznit, že rozpustnost vodíku v tavenině při určité teplotě je závislá na parciálním tlaku vodíku v okolní atmosféře, což vyjadřuje Sievertsův zákon.

## Vznik homogenní bubliny



Obr. 15 Rozpustnost vodíku v hliníku –podmínka vzniku homogenní bubliny [6]

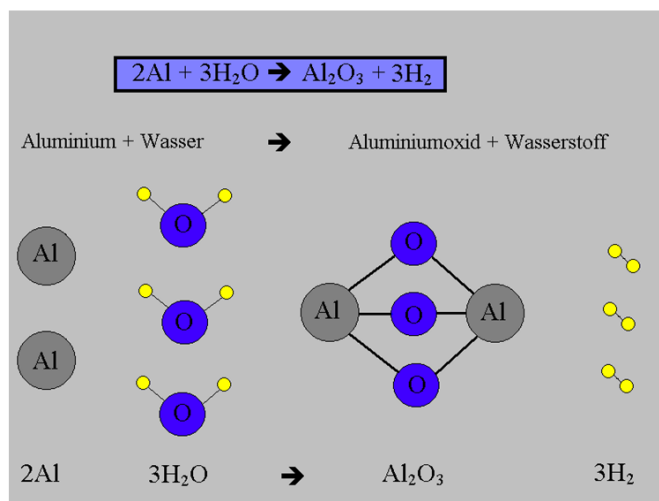
Dle [1] je v reálném prostředí však vznik bubliny homogenní nukleací velmi nepravděpodobný a uvažujeme pouze mechanismus heterogenní nukleace bubliny, při němž jako krystalizační zárodek slouží cizí tuhá částice. Možnost nukleace bubliny na cizím zárodku je významným způsobem dána povrchovým napětím mezi taveninou, cizí částicí a plynem.



Obr. 16 Povrchové napětí a vznik bubliny na cizím zárodku [6]

Pro vznik takové bubliny je vhodné, aby hodnota povrchového napětí mezi zárodkem a taveninou byla co nejmenší, neboli aby částice vhodné pro nukleaci byly nesmáčivé. Z tohoto důvodu jsou častými nukleačními zárodky

především oxidy. Po tomto rozboru lze tedy obecně říci, že pórovitost odlitků ze slitin hliníku je závislá na obsahu vodíku v tavenině, ale také významným způsobem na obsahu oxidických vměstků. Na obr.17 je znázorněna oxidace Al, která je zároveň nejčastější způsob znečištění slitin hliníku, což je důsledek vysoké afinity hliníku ke kyslíku.



Oxidace Al je exotermická reakce  
 $2\text{Al} + 3/2\text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{teplo!!!} \quad \Delta G^\circ_{1000\text{K}} = -644\text{ kJ/mol O}_2$

Obr.17 Znázornění oxidace Al [6]

### 2.2.4.1 Zdroje vodíku [1]

Nejčastějším zdrojem vodíku je vlhkost, jejíž obsah ovlivňuje několik faktorů:

#### a) Nové vyzdívky a tavící kelímky

Vyzdívky v pecích jsou často tvořené žárovevnými hmotami, jejíž součástí je voda, proto je velmi důležité před uvedením tavícího agregátu dodržet sintrační křivky, dle kterých lze vlhkost postupně odstranit. Stejný postup je třeba dodržet po instalaci nového tavícího kelímku spolu s podložkou. Této problematice je věnována samostatná část v kapitole 2.2.3.2

## b) Vsázka

Neopomenutelným a nezanedbatelným zdrojem vodíku může být samotná vsázka, kde je voda vázána na povrchu v pórech a v hydroxidech, které se tvoří na zoxidovaném povrchu. Z tohoto důvodu je nepřípustné vsázet materiál do roztaveného kovu a je doporučeno jeho důkladné předehřátí.

## c) Krycí a rafinační sole

Vždy se musí dbát na to, aby tyto přípravky používané v metalurgické praxi byly dostatečně vysušeny. Vzhledem k jejich hygroskopické povaze bývají také častým zdrojem vlhkosti, tudíž vodíku. S tím je spojená i nutnost předehřívát všechno pracovní nářadí.

## 2.2.4.2 Odplyňování [1], [2]

Jak je v této práci mnohokrát zmíněno, tak je třeba věnovat zvýšenou pozornost negativním vlastnostem hliníkových slitin a to je zejména sklon k vytváření porézní struktury. Mechanismům příčin a jejího vzniku je věnována kapitola 3.1.

Postupů jak tomuto jevu zabránit je dle [2] několik:

## 1) Profukování taveniny inertními plyny

Tato metoda byla použita pro praktickou část této diplomové práce, proto je jí věnována samostatná kapitola 3.1.2.

V současnosti jsou na trhu např. firmou Foseco s.r.o. také nabízeny zařízení typu MTS 1500, které zajišťuje odplyňování taveniny spolu s použitím rafinační soli, a to vše v plně automatizovaném procesu. Při této úpravě taveniny dojde nejprve k ponoření rotoru do taveniny, který po jeho spuštění vytvoří

potřebný vír. Do tohoto víru je automaticky nadávkováno předem určené množství rafinační soli, která je jeho prostřednictvím vtažena až do spodní části pánve. Po této části procesu je spuštěn do taveniny tzv. vlnolam a začne samotné odplyňování. Celý průběh je znázorněn na obr. 18.



Obr. 18 Úprava taveniny zařízením MTS 1500 [15]

## 2) Výdrž taveniny v atmosféře inertních plynů nebo vakuu

Dle autora je tato metoda založena na principu rozdílného tlaku plynu v tavenině a parciálního nebo celkového tlaku nad taveninou. Pro dosažení co nejlepšího odplyňovacího efektu se doporučuje tlak nad hladinou snížit co nejnižší a čas po který je tavenina tomuto prostředí vystavena prodloužit co nejdéle. Pro použití této metody je třeba uvažovat s poměrně velkými investicemi na zařízení, kam se tekutý kov přemísť.

## 3) Fyzikální metody odplyňování.

Při těchto metodách se využívá čistě fyzikálních principů. Vytváří se uvnitř materiálu mikroskopické dutiny s vysokým stupněm vakua do kterých se dle [2] vylučuje rozpuštěný plyn, postupně se zde hromadí a vytváří bubliny, které se dostávají do okolní atmosféry.



Vytvoření prvotních mikroskopických dutin dosahujeme např. vnášením vibrací či ultrazvukového vlnění do taveniny. Opět je třeba uvažovat potřebu vlastnit speciální zařízení zajišťující správnou efektivitu této metody.

## **2.2.5 Spektrální analýza [9], [10]**

Dalším bodem zadání této diplomové práce bylo provedení spektrální analýzy, nebo-li kontroly chemického složení.

Počátky spektrální analýzy byly položeny již v 17. století, když Isaac Newton objevil rozklad slunečního světla na jeho základní složky pomocí skleněného hranolu. Tím byly objeveny a identifikovány spektrální bary.

Základní myšlenka tohoto rozboru spočívá ve znalosti atomu, který se skládá z kladně nabitého jádra a záporných elektronů, které kolem krouží v určených dráhách. Jestliže se při analýze pomocí jiskření dodá atomu energie, přejde elektron na vzdálenější dráhu. Základní energie elektronu se tím zvýší. Z důvodu poměrně specifických hladin této energie může atom přijímat pouze určitá přesná množství energie. Z tohoto vyplývá, že pokud dojde k návratu do základního energetického stavu, tak atom opět může vyzářit pouze určité přesně definované množství energie. Výsledek tohoto jevu je světelná částice (foton) světla určité vlnové délky.

Jako spektrometr lze tedy označit spektrální přístroj měřící světelnou intenzitu spektrálních čar pomocí fotonásobičů. Tyto zařízení se zhotovují dle předem určeného účelu použití. Pro univerzální měření se zhotovují tzv. spektrografy.

Pro jednotlivé měřené prvky se stanoví optimální spektrální čáry (tzv. analytické čáry). Dle [10] se rovnice mřížky (rovnice definující úhel ohybu v závislosti na vlnové délce) vypočtou polohy na Rowlandově kružnici, kde budou vybrané analytické čáry zobrazeny. V těchto polohách se umístí úzké výstupní štěrby, umožňující průchod pouze jedné analytické čáry a za



kterou je umístěn fotonásobič. Měřenými hodnotami jsou pak napětí na kondenzátorech, které se pomocí analytických funkcí vyhodnocují jako analytické výsledky.

Na konci měření jsou tedy k dispozici intenzity emitovaných jednotlivých prvků, ty jsou odvislé od množství světla, které prošlo štěrbinou a to odpovídá koncentraci prvku ve vzorku.

Analyzovaný elektricky vodivý vzorek se vloží do jiskříště, kde mezi ním a protielektrodou dojde k vytvoření elektrického oblouku. Jiskříště je s tzv. argonovým proplachem, což zajišťuje bezkyslíkatou atmosféru výboje, která je potřebná pro správné jiskrové buzení. V důsledku jiskření se „vypaří“ část měřeného materiálu, přičemž vzniklá pára obsahuje všechny ve vzorku přítomné prvky. Vybuzené atomy emitují spektrální čáry. Toto záření je čočkou nebo optovodičem přenášeno na vstupní štěrbinu spektrometru.

## 2.3 Časté odlitky ze slitin hliníku odlévaných vysokotlakým litím v ČR

- 1) Střešní nosiče na osobních automobilech

Slitina: AlSi10Mg



Obr. 19 Střešní nosič [8]

- 2) Kráječ na vajíčka
- Slitina AlSi10Mg



Obr. 20 Kráječ na vajíčka [8]

- 3) Lis na česnek
- Slitina AlSi9Cu3



Obr. 21 Lis na česnek [8]

4) Louskáček na ořechy  
Slitina AlSi10Mg



Obr. 22 Louskáček na ořechy [8]

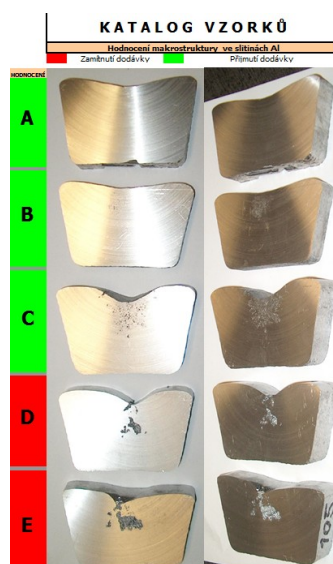
### 3. PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

#### 3.1. Metalurgický proces přípravy slitin hliníku pro výrobu odlitků vysokotlakým litím

Jedním bodem zadání této diplomové práce je návrh metalurgického procesu a přípravy taveniny pro výrobu odlitků vysokotlakým litím.

Celý proces zajišťující výsledek v podobě kvalitního hliníkového odlitku o předepsaných mechanických vlastnostech a předepsané geometrii začíná již nákupem kvalitního materiálu od dodavatele. Již v tomto kroku lze významně ovlivnit celý metalurgický proces. Je proto třeba klást důraz na vstupní kontrolu slitiny a to hned v několika krocích:

- 1) Ověření chemického složení housek odpovídající příslušné normě, kterou je materiál označen pomocí spektrální analýzy. Tato kontrola musí být bezpodmínečně provedena u všech šarží obsažených v dodávce.
- 2) Kontrola makrostruktury housek, a to opět u každé tavby, která je v dodávce obsažena. Nepřípustnost kategorií D a E viz obr. 23 je především v nebezpečí vody, která může být obsažena uvnitř dutin.



Obr. 23 Katalog vzorků hodnotící makrostrukturu housek Al [13]

Housky by neměly být na povrchu viditelně nadměrně zoxidované.

Následujícím krokem po ověření kvality vstupního materiálu je samotné tavení. Při tavení se využívají tomu určené tavící agregáty, kterých je několik typů a těm nejběžněji používaným je věnována v této práci samostatná kapitola. Celá tavba musí probíhat v co nejkratším časovém úseku, aby nedocházelo ke zbytečnému přehřívání taveniny. Proto je potřeba zajistit, aby tavení slitin bylo vždy co nejvíce intenzivní bez nadměrného víření. Bezpodmínečně se však musí dosáhnout teploty přehřátí, která nám umožní provést nutné metalurgické operace, jakými jsou např. odplyňování, rafinace (očkování či modifikace např. u gravitačního lití). Po provedení všech těchto jednotlivých kroků, během kterých dochází k poklesu teplot, musí mít materiál stále dostatečnou licí teplotu, která se dle [2] většinou pohybuje 50 – 100°C nad teplotou tání čistého kovu nebo ve stejném rozmezí nad teplotou likvidu odlévané slitiny.

Vsázka do tavících pecí se skládá z čisté slitiny nebo housek, vratného či přetavovaného materiálu a popřípadě předslitin. Právě zmíněnému složení vsázky z pohledu housek a přetavovaného materiálu a možného vlivu na naplynění taveniny je věnována praktická část této diplomové práce.

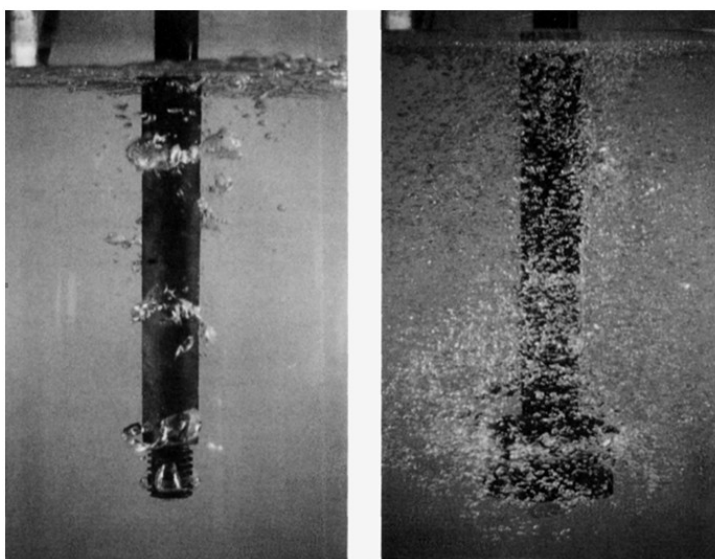
Velkou pozornost je třeba věnovat rafinaci taveniny za použití např. rafinačních solí a odplyňovacích zařízení. V tomto kroku je snahou z taveniny odstranit oxidické vměstky a zejména vodík, který by svou omezenou rozpustností v hliníku způsoboval porezitu v odlitku. Vzhledem k významnosti této části metalurgického procesu jsou tomuto tématu věnovány následující kapitoly.

Následujícím a nezbytným krokem je dopravení upravené taveniny do dávkovacích pecí a to za dostatečné teploty. I zde platí, že je třeba se vyvarovat zbytečnému víření a promíchávání taveniny, aby bylo zabráněno téměř okamžité oxidaci. V dávkovací peci je důležité dohlížet a pravidelně ověřovat dodržování potřebných licích teplot.

### 3.1.1 Odplyňování probubláváním inertního plynu [1], [2]

Výsledky měření v praktické části této diplomové práce jsou vyhodnoceny právě po použití metody odplyňování pomocí inertního plynu, a to dusíku 4,6 s délkou procesu 5 min. Jiné možné způsoby odplyňování taveniny slitin hliníku jsou uvedeny v teoretické části.

Jak je uvedeno v literatuře [1, s. 71], tak „*tato metoda je založena na difuzi vodíku do bublin s nulovým parciálním tlakem vodíku, s nímž je vynášen na hladinu, nebo s ním chemicky reaguje. Tyto plyny se vhání do taveniny v blízkosti dna pánve tak, aby tvořili co nejmenší bubliny.*

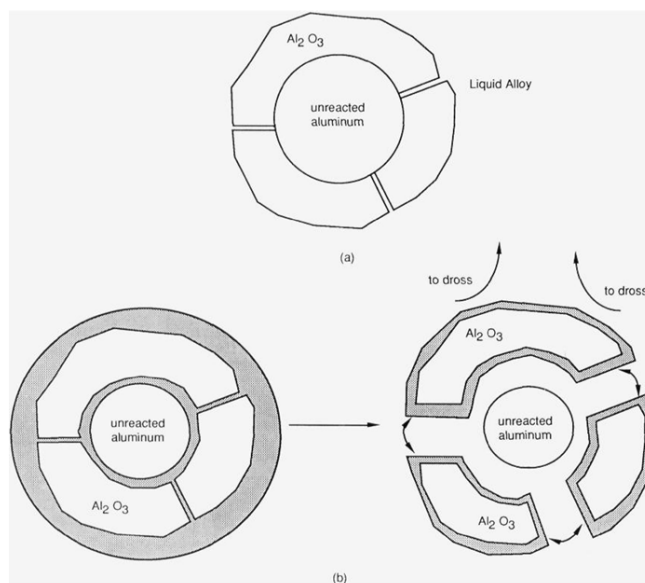


Obr. 24 Odplynění rotorem na zařízení FDU [1]

Na obr. 24 je vidět správné odplynění inertním plynem za pomoci odplyňovacího rotoru, který zajistí co nejvhodnější parametry celého procesu, jakými jsou rychlost vyplouvání bublinek na povrch a jejich velikost. Zejména s menší velikostí bublinek se dosáhne jejich většího celkového povrchu při stejném objemu plynu, což je výhodné pro výslednou hodnotu tzv. **dichte indexu**.

### 3.1.2 Využití rafinační soli [1],[2]

Při přípravě slitin hliníku pro výrobu odlitků vysokotlakým litím se spolu s výše uvedeným odplyňováním taveniny využívá účinků rafinačních solí. Ty jsou dle [1] nejčastěji na bázi chloridových a fluoridových solí s přísadou dalších aktivních látek. Jak vyplívá z významu slova rafinační, jedná se o snahu snížení množství oxidických vměstků v tavenině a zvýšení výtěžnosti kovového hliníku přidáním již zmíněných rafinačních solí.



Obr. 25 Rozrušení oxidických obálek při použití rafinační soli [14]

Na obr. 25 je znázorněna hlavní funkce těchto přípravků, kde po jejich roztavení dochází k narušení oxidické vrstvy, která vzniká kolem částic nezreagovaného hliníku. Následně dojde k obalení oxidických vměstků a jejich vynesení na hladinu díky rozdílné měrné hmotnosti rafinační soli a vměstků. Odtud jsou odstraněny (staženy) v podobě známé jako stěry. Ty však obsahují určitý podíl kovového hliníku, který znamená pro slévárnu značnou ekonomickou ztrátu. Lze tedy říci, že obecným cílem těchto pochodů je snížení oxidických vměstků v tavenině, a to takovými technologickými postupy, kdy je dosaženo maximálního snížení ztráty kovu ve stěrech.

K použití a samotné aplikaci dochází až po natavení kovové vsázky pece pomocí ponorných zvonů. Z důvodu požadavku na dokonalé promíchání



rafinační soli v celém objemu taveniny je často tento proces spojován s odplyňováním taveniny v FDU. Pohyb rotoru při odplyňování a funkce tzv. vlnolamu na tomto zařízení zajistí řádné promíchání viz obr. 26.



Obr. 26 Proces odplyňování taveniny inertním plynem a promíchávání s rafinační solí [8]

Na trhu působí více výrobců s poměrně širokým sortimentem těchto zařízení a přípravků pro úpravu taveniny. V tomto bodu přípravy vysokotlakých slitin hliníku pro praktickou část této práce byla použita rafinační sůl Arsal 2125, a to v množství 1,5kg na 460kg tekutého kovu v transportní pánvi.

### **3.2 Měření naplynění taveniny – metoda dvojího vážení [1],[2]**

Z několika metod pro kontrolu naplynění taveniny byla použita metoda měření hustoty kovu, neboli metoda dvojího vážení. Tato metoda je ve slévárnách velmi rozšířená, a to díky poměrně jednoduchému postupu, ale především díky zjištění výsledku měření za přijatelnou dobu.

Dle [2] je principem porovnání hustoty vzorku slitiny, který stuhnul při atmosférickém tlaku se vzorkem, který ztuhl za podtlaku. V tomto případě byl použit snížený tlak 80 mbar s délkou působení 4 min. Dle stejného zdroje je



využito Sievertsova zákona, podle něhož je za podtlaku nižší rozpustnost vodíku a proto se při tuhnutí vyloučí více vodíkových bublin než při atmosférickém tlaku. Bubliny zůstávají v kovu uzavřeny a tím snižují jeho hustotu.

Vzorky pro měření byly připraveny na zařízení pro podtlakové zkoušky 3VT viz obr.27 a), kdy při zkoušce ztuhne asi 90 g taveniny v našlichtovaném ocelovém kelímku ve vakuové komůrce za podtlaku 80 mbar a při atmosférickém tlaku. K předehřátí kelímku mají přístroje předehřívací komůrku, kde se kelímky předehřívají až na 200°C.

Po získání dvou takto připravených vzorků se provede dvojí vážení. K tomuto kroku byla použita Váha MK 2200, která umožňuje jednoduchou obsluhou stanovení hustoty pevných těles od  $1\text{g/cm}^3$  do  $25\text{g/cm}^3$ . Interní počítač určuje na základě zjištěných vah samostatně hustotu a udá ji v  $\text{g/cm}^3$ . Stejně tak vypočítá vnitřní počítač stisknutím tlačítka hustotu vyjádřenou v %, nebo-li zobrazí výsledný stupeň DICHTINDEXU. Určení hustoty pevného tělesa probíhá na základě Archimedova principu, kdy je každý z páru vzorků vážen samostatně na vzduchu a ponořený ve vodě. K tomu jsou výše uvedené váhy vybaveny kádinkou na vodu spolu se závěsným zařízením viz obr.27 b).



a)



b)

Obr. 27 Podtlakové zařízení 3VT a váha MK 2200 [6]

### 3.3 Shrnutí postupu měření

K získání potřebných výsledků a závislostí dle zadání této práce bylo nutné provést řadu operací, postupů a měření.

#### 1) Tavení

Jednotlivé tavby byly provedeny ve třech různých agregátech, a to šachtových pecích s plynovým ohřevem, kelímkové peci s plynovým ohřevem a v elektrické kelímkové peci s odporovým ohřevem. Pro experimentální část této práce byly vybrány vysokotlaké slitiny hliníku  $AlSi9Cu3$  a  $AlSi12$ , které jsou hojně využívány především v automobilovém průmyslu a označovány německou normou DIN 226 a DIN 231.

Tavicí teplota byla na regulátorech všech agregátů nastavena na  $750^{\circ}C$  a před dalším použitím ověřena ruční termosondou. Přímou v tavící peci nebylo použito žádných krycích či rafinačních solí.

Vsázka byla tvořena z housek a vratného materiálu dle přiložených výsledků. Pro přesnost výsledků byla však nejprve vsázka provedena do prázdné pece a bylo vsazeno 100% materiálu v houskách. Tento materiál byl po všech následujících operacích dopraven do dávkovací pece, kde proběhlo odlití odlitků z této slitiny. Vratný materiál (vtoková soustava, vlnovce, vzdušníky atd.) byl zvlášť separován, aby bylo při dalších experimentech známo, že použitý vrat pro další vsázky je jen jednou přetaven. Takto bylo provedeno deset taveb. V následujících tavnách byl vždy upraven poměr housek ku vratnému materiálu a to nejprve na 50 % housek a 50% vratu a později byly provedeny tavby, kde se vsázka skládala pouze ze 100% vratného materiálu.

#### 2) Odplynění a rafinace

Po natavení vsázky byl materiál vylit z tavících pecí do transportní

pánve viz obr. 28 a převezen k odplynění taveniny a k jejímu ošetření rafinační soli k zařízení FDU. Zde na převezené množství 460kg tekutého kovu bylo aplikováno 1,5kg rafinační soli Aرسال 2125 a spuštěn rotor odplyňovacího zařízení, přes který byl do taveniny vháněn inertní plyn dusík 4,6 po dobu pěti minut. Po dokončení tohoto procesu byly s hladiny staženy stěry.



Obr. 28 Vylévání nataveného kovu z šachtové pece [8]

### 3) Odebrání kontrolního vzorku pro spektrální analýzu

Před spuštěním výše uvedeného procesu byl odlit kontrolní vzorek do připravené kokilky pro ověření chemického složení prostřednictvím spektrální analýzy na spektrometru. Na tomto zařízení je proveden záznam příslušných informací jako např. normy slitiny, číslo tavby, tavící pece atd. Výsledkem měření je atest o chemickém složení pro danou tavbu viz příloha 2 této diplomové práce.

### 4) Zhotovení kontrolních vzorků pro měření DI

Z odplyněné taveniny byl odebrán materiál do dvou kovových kelímků, které byly předehřáty na 200 °C, z nichž jeden byl vložen do vakuové komory, kde byl po čtyři minuty vytvořen podtlak 80 mbar. Druhý vzorek byl ponechán na vzduchu. Po uplynutí

předepsaného času byly vzorky z kelímků vyklepány a označeny číslem tavby.

#### 5) Měření DI

Připravené vzorky byly jednotlivě převáženy na speciálně k tomu určených váhách, přičemž vždy každý vzorek byl zvážen jednou na vzduchu a jednou ponořený ve vodě. Po těchto krocích bylo dosaženo potřebných výsledků.

### 3.3.1 Postup měření chemického složení

#### 1) Příprava měřeného vzorku

Nejlépe z odlitku se provede odříznutí části materiálu s pokud možno rovnou dosedací plochou, aby překryla jiskřiště na spektrometru.

Po té se vzorek obrousí, např. na pásové brusce, aby byly co nejdůkladněji z povrchu odstraněny všechny nečistoty a oxidy.

#### 2) Měření chemického složení

Vložení připraveného vzorku do jiskřiště spektrometru, tak aby bylo zcela překryto. Dále je vzorek uchycen pomocí ramena, které zároveň uzavře celý obvod, aby bylo možné provést vyjiskření.

V příslušném programu je možno nastavit specifikaci měřeného materiálu, jméno obsluhy či další potřebné charakteristiky měření.

Takto je vše připraveno pro spuštění samotného měření.

#### 3) Vyhodnocení výsledků

Po řádném ukončení měření se na monitoru přístroje zobrazí jednotlivé koncentrace příslušných prvků. Pokud je již určitá norma chemického složení přednastavena, je zařízení schopno obsluhu na případné odchylky ihned upozornit.

## 3.4 Seznam použitého zařízení

### 3.4.1 Tavicí agregáty

1. Šachtová tavicí pec Striko Westofen, MH II – T 2000/1000G  
Kapacita 2000 kg  
Max. tavicí výkon 1000 kg/hod  
Max. teplota lázně 760 °C  
Instalovaný výkon hořáků 825 kW
2. Šachtová tavicí pec Striko Westofen, MH II – T 3000/2000G  
Kapacita 3000 kg  
Max. tavicí výkon 2000 kg/hod  
Max. teplota lázně 760 °C  
Instalovaný výkon hořáků 1675 kW
3. Plynová kelímková pec Striko Westofen CMHG – T800  
Kapacita 800 kg  
Max. tavicí výkon 370 kg/hod  
Max. tavicí teplota 900°C  
Instalovaný výkon hořáků 465 kW
4. Elektrická odporová kelímková pec MORGAN  
Kapacita 600 Kg  
Max. tavicí výkon 240 kg/hod  
Max. tavicí teplota 900°C

### 3.4.2 Doplnující zařízení

- FDU odplyňující zařízení
- Zařízení na podtlakové zkoušky 3VT...
- Speciální Váha MK 2200
- Spektrometr SPECTROMAXx

### 3.5 Výsledky měření

V tabulkách 3.1 a 3.2 jsou provedeny záznamy výsledků z měření naplynění slitin, které byly nataveny v šachtových pecích.

Tab. 3.1 Naplynění slitiny AlSi9Cu3

<b>Šachtová pec Striko Westofen AlSi9Cu3(Fe) – DIN 226</b>						
Číslo měření	100% housek 0% vratného materiálu		50% housek 50% vratného materiálu		0% housek 100% vratného materiálu	
	Před odplyněním	Po odplyněním	Před odplyněním	Po odplyněním	Před odplyněním	Po odplyněním
1	7,89	0,38	9,77	0,72	11,71	0,76
2	7,15	0,37	10,22	0,88	10,94	1,12
3	8,36	0,45	10,59	0,65	10,59	0,95
4	8,06	0,37	9,06	0,72	10,03	0,72
5	7,94	0,37	9,73	1,09	10,71	0,88
6	9,07	0,38	8,87	0,78	12,97	0,79
7	8,29	0,46	9,56	0,82	11,37	0,75
8	7,47	0,42	11,09	0,72	11,96	1,15
9	7,94	0,39	10,43	0,76	10,84	0,84
10	7,97	0,37	9,61	0,72	10,81	0,78

Zdroj: vlastní zpracování

Tab. 3.2 Naplynění slitiny AlSi12

<b>Šachtová pec Striko Westofen AlSi12(Fe) – DIN 231</b>						
Číslo měření	100% housek 0% vratného materiálu		50% housek 50% vratného materiálu		0% housek 100% vratného materiálu	
	Před odplyněním	Po odplyněním	Před odplyněním	Po odplyněním	Před odplyněním	Po odplyněním
1	9,34	0,38	9,46	0,56	10,37	0,95
2	8,64	0,38	9,12	0,68	9,67	0,74
3	8,76	0,51	9,67	0,45	9,67	0,77
4	9,04	0,64	10,56	0,77	10,33	0,95
5	7,58	0,66	11,18	0,51	9,16	0,71
6	7,49	0,45	11,06	0,86	9,17	0,94
7	7,93	0,37	10,36	0,41	9,62	1,07
8	8,25	0,37	10,97	0,33	8,77	0,97
9	8,54	0,37	9,56	0,39	10,08	0,91
10	8,89	0,39	9,71	0,47	9,55	0,96

Zdroj: vlastní zpracování

Naplynění slitin natavených v plynových kelímkových pecích jsou zaznamenány v tabulkách 3.3 a 3.4.

Tab. 3.3 Naplynění slitiny AISi9Cu3

<b>Plynová kelímková pec Striko Westofen</b> <b>AISI9Cu3(Fe) – DIN 226</b>						
Číslo měření	100% housek 0% vratného materiálu		50% housek 50% vratného materiálu		0% housek 100% vratného materiálu	
	Před odplyněním	Po odplynění	Před odplyněním	Po odplynění	Před odplyněním	Po odplynění
1	15,32	1,63	17,26	2,47	17,33	2,90
2	15,59	1,87	17,37	2,17	18,12	2,00
3	14,73	1,76	16,58	1,78	17,82	2,13
4	15,94	1,45	16,77	1,90	18,87	2,51
5	16,54	1,87	16,62	1,99	17,64	2,01
6	15,77	1,64	17,44	2,15	19,25	2,92
7	16,48	2,04	16,91	2,17	18,91	2,51
8	16,24	1,84	17,09	2,02	18,06	2,88
9	15,28	1,77	16,64	2,67	17,84	2,05
10	15,64	1,60	16,37	2,05	18,02	2,77

Zdroj: vlastní zpracování

Tab. 3.4 Naplynění slitiny AISi12

<b>Plynová kelímková pec Striko Westofen</b> <b>AISI12(Fe) – DIN 231</b>						
Číslo měření	100% housek 0% vratného materiálu		50% housek 50% vratného materiálu		0% housek 100% vratného materiálu	
	Před odplyněním	Po odplynění	Před odplyněním	Po odplynění	Před odplyněním	Po odplynění
1	14,77	1,34	16,34	1,03	18,34	1,90
2	14,92	1,97	16,03	1,86	18,06	2,04
3	15,94	1,40	15,67	1,67	18,76	2,76
4	16,33	1,32	16,97	1,80	17,64	1,99
5	16,97	1,29	17,22	0,94	17,88	2,34
6	16,94	1,18	16,2	1,30	16,97	2,15
7	16,26	1,73	15,37	1,17	17,52	2,29
8	15,62	1,27	16,98	1,19	17,36	1,39
9	16,73	1,38	15,64	1,84	18,49	1,82
10	15,88	1,19	17,03	1,24	18,44	2,37

Zdroj: vlastní zpracování

Výsledky měření dichte indexu slitin tavených v elektrické odporové peci jsou uvedeny v tabulkách 3.5 a 3.6..

Tab. 3.5 Naplynění slitiny AISi9Cu3

<b>Elektrická pec MORGAN</b> <b>AISI9Cu3(Fe) – DIN 226</b>						
Číslo měření	100% housek 0% vratného materiálu		50% housek 50% vratného materiálu		0% housek 100% vratného materiálu	
	Před odplyněním	Po odplynění	Před odplyněním	Po odplynění	Před odplyněním	Po odplynění
1	9,07	0,89	12,67	1,39	12,15	1,39
2	10,97	1,12	11,64	1,15	12,97	1,93
3	10,49	1,36	11,23	1,73	11,49	1,52
4	11,88	1,15	12,07	1,13	12,88	1,98
5	10,37	1,49	10,66	1,25	10,37	1,20
6	9,49	0,72	10,31	0,88	12,49	1,16
7	11,67	0,72	10,27	1,09	11,67	1,37
8	10,03	1,94	11,94	0,77	11,03	1,91
9	11,19	1,50	10,15	0,84	12,19	1,75
10	10,17	0,92	10,67	1,07	12,17	1,56

Zdroj: vlastní zpracování

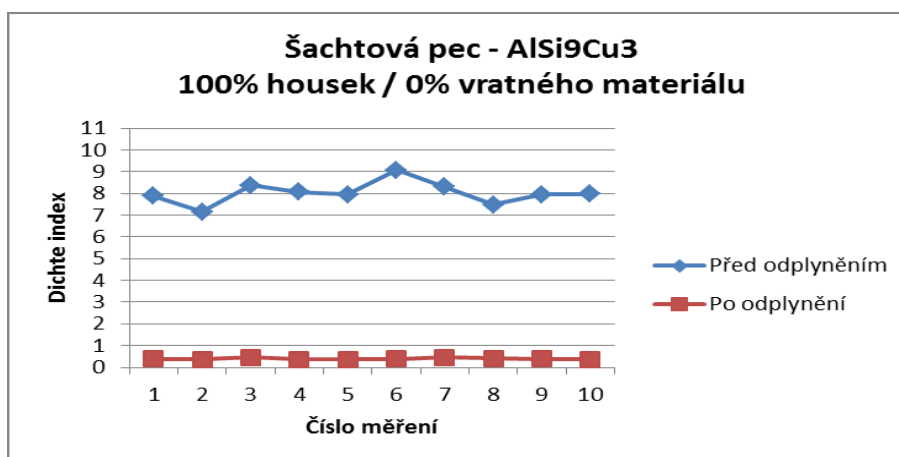
Tab. 3.6 Naplynění slitiny AISi12

<b>Elektrická pec MORGAN</b> <b>AISI12(Fe) – DIN 231</b>						
Číslo měření	100% housek 0% vratného materiálu		50% housek 50% vratného materiálu		0% housek 100% vratného materiálu	
	Před odplyněním	Po odplynění	Před odplyněním	Po odplynění	Před odplyněním	Po odplynění
1	11,12	1,43	9,35	1,78	11,15	1,61
2	9,22	0,78	9,74	1,87	10,26	1,96
3	8,76	0,78	8,88	1,71	10,89	1,34
4	8,92	1,12	9,21	1,30	9,37	1,31
5	9,46	1,87	9,03	1,88	11,56	1,20
6	9,07	0,94	10,54	1,78	11,93	1,70
7	8,37	1,30	10,22	1,25	11,92	1,78
8	9,11	0,86	8,94	1,28	10,77	1,83
9	10,09	0,65	9,93	1,32	9,86	1,88
10	9,52	1,29	9,62	1,49	11,2	1,86

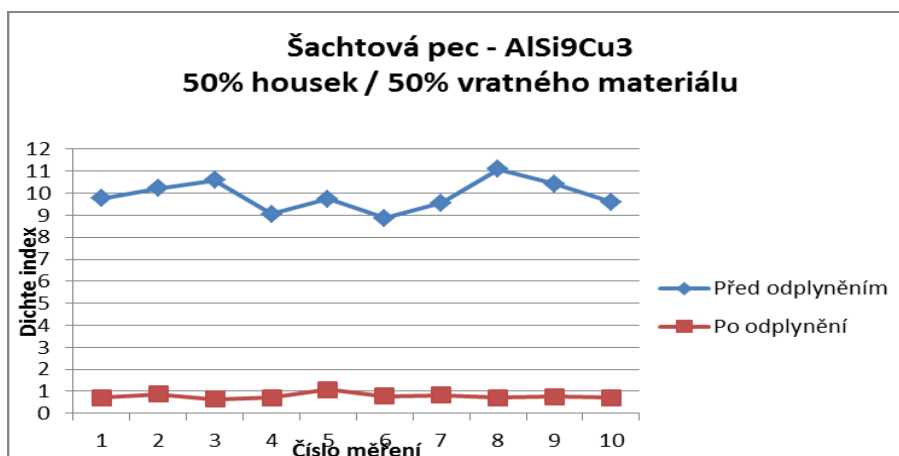
Zdroj: vlastní zpracování



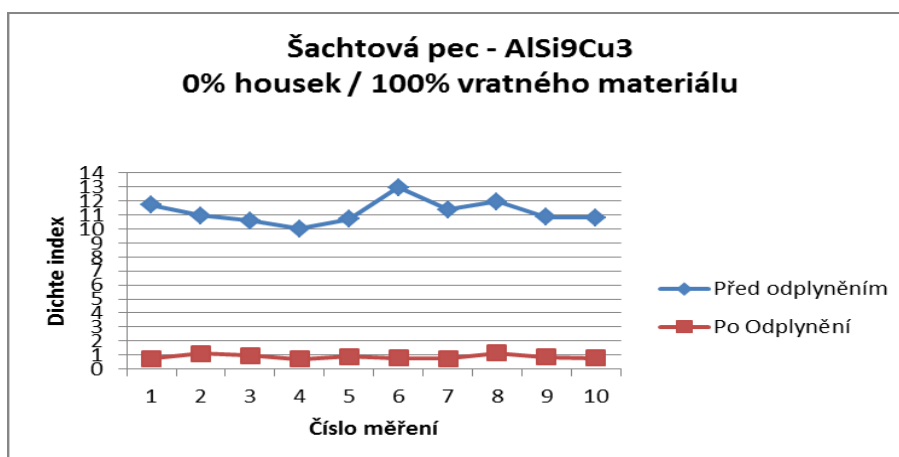
Pro názornost srovnání jednotlivých typů tavicích agregátů a složení vsázky z pohledu taveného poměru housek ku vratnému materiálu jsou uvedeny následující grafy:



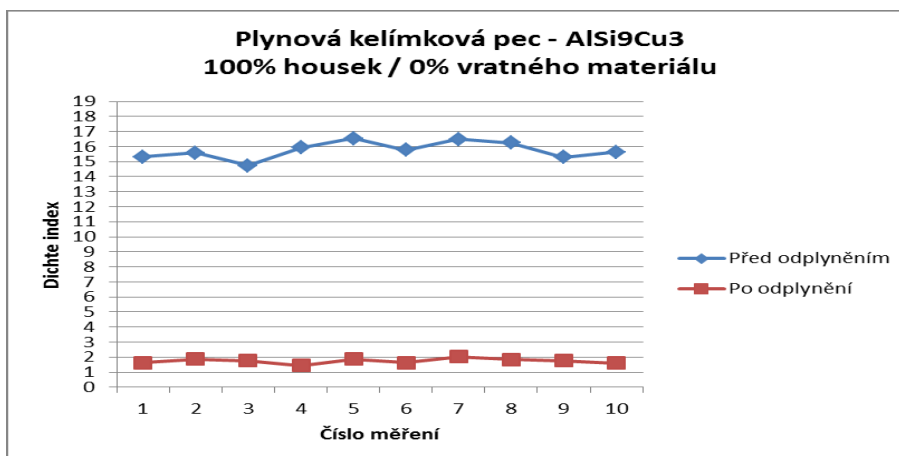
Graf. 1 Dichte index šachtové pece 100%housky/0% vrat



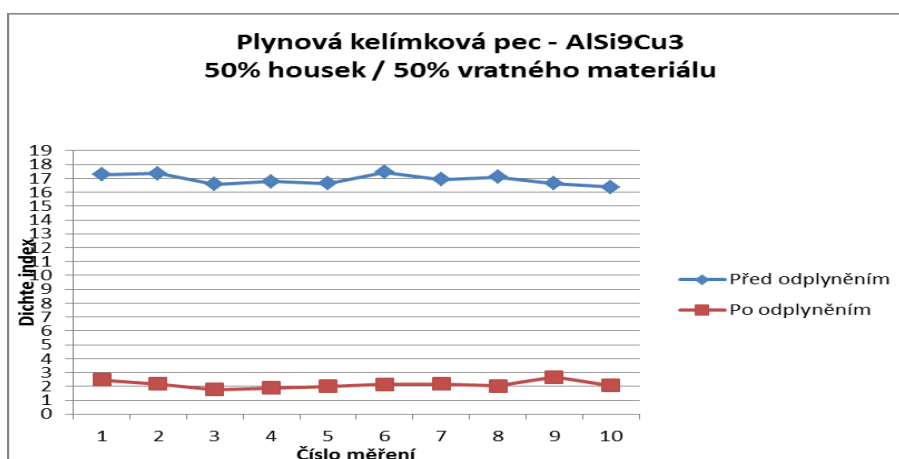
Graf. 2 Dichte index šachtové pece 50% housky/50%vrat



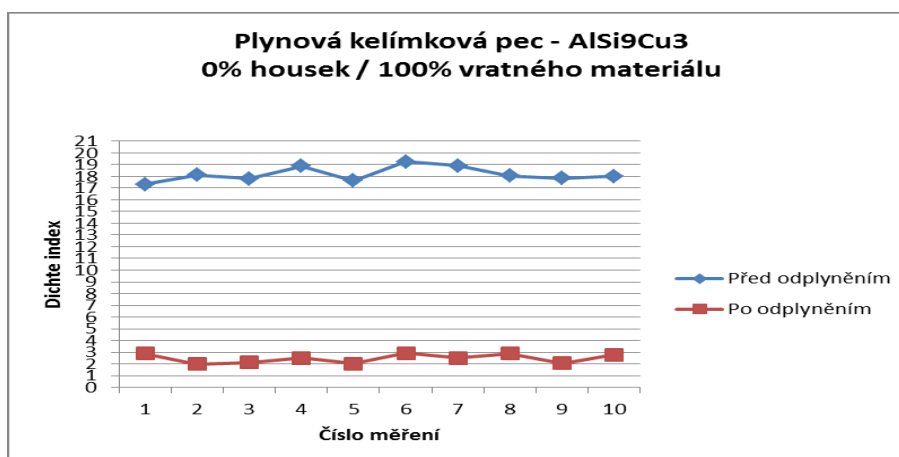
Graf. 3 Dichte index šachtové pece 0% housky/100% vrat



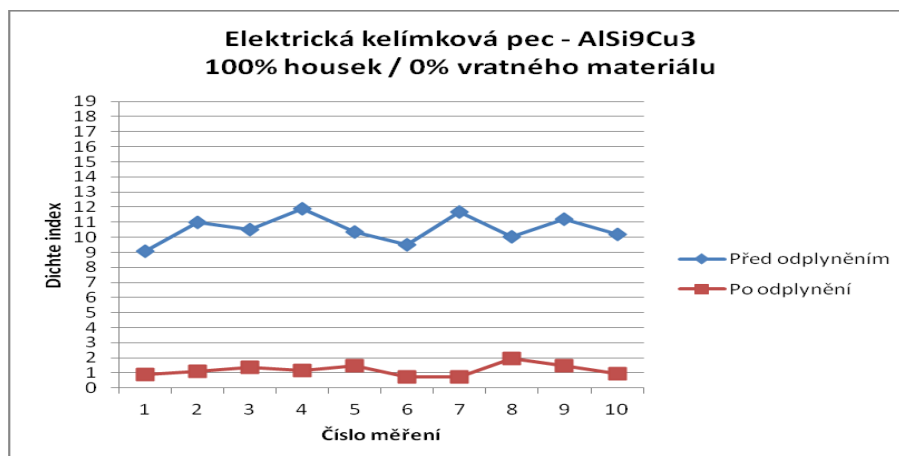
Graf. 4 Dichte index plynové kelímkové pece 100%housky/0% vrat



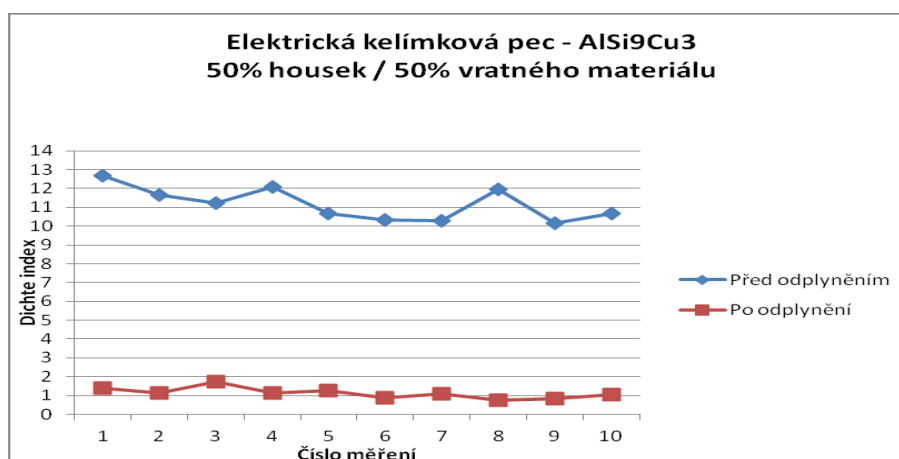
Graf. 5 Dichte index plynové kelímkové pece 50% housky/50%vrat



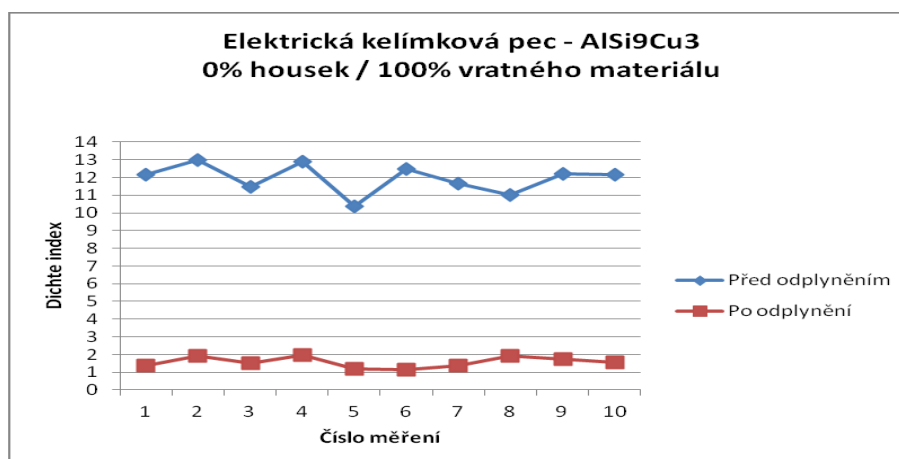
Graf. 6 Dichte index plynové kelímkové pece 0% housky/100% vrat



Graf. 7 Dichte index elektrické kelímkové pece 100%housky/0% vrat



Graf. 8 Dichte index elektrické kelímkové pece 50% housky/50%vrat



Graf. 9 Dichte index elektrické kelímkové pece 0% housky/100% vrat

## 4. Diskuse poznatků

Na základě experimentálního měření bylo v praxi ověřeno tvrzení mnoha zdrojů, jako je např. [1], [2], a to především vhodnost šachtových pecí pro tavení hliníkových slitin ve slévárnách z důvodů nejnižších hodnot naplynění taveniny. Toto tvrzení je patrné z výsledků měření uvedených v tabulkách 3.1 – 3.6 v kapitole 3.5. Pro názornost jsou tabulky 3.1 – 3.3 doplněny grafy 1 – 9.

Při tavení slitiny v tomto tavícím agregátu se téměř vždy hodnota dichte indexu v neodplyněném stavu blížila 9 až 10, což lze přisuzovat především oddělenému prostoru pro tuhou tavenou vsázku a již natavený materiál. Těchto výsledků bylo dosaženo ve všech třech typech vsázky.

Při porovnání kelímkové pece plynové a elektrické je opět z pohledu výsledného naplynění taveniny spíše vhodnější kelímková pec elektrická odporová, přičemž lze dle dosažených výsledků pozorovat jistý vliv podílu vratného materiálu na celé vsázce. Se zvyšujícím se obsahem vratného materiálu byl vždy naměřen dichte index s vyšší hodnotou, což lze přisuzovat celkově větší ploše povrchu vratného materiálu, oproti houskám, na kterém jsou vázány oxidy a hydroxidy, které jak již bylo zmíněno, mají příslušný vliv na naplynění taveniny.

Přes poměrně výrazné rozdíly naplynění taveniny ve smyslu rozdílného tavícího agregátu i složení vsázky lze z experimentálně získaných výsledků konstatovat, že po použití odplyňovacího zařízení pomocí inertního plynu je vždy dosaženo požadovaných hodnot dichte indexu, který se ve slévárnách často pohybuje v hodnotách 2-3 DI. Z pohledu naplynění taveniny lze tedy doporučit všechny tři použité typy tavících pecí pro použití ve slévárnách slitin hliníku zabývající se litím pod tlakem.

S odvoláním na experiment uvedený v [4] zabývající se vlivem několikanásobného přetavování slitiny na naplynění a mechanické vlastnosti

slitiny lze předpokládat, že pokud by byl při experimentu této diplomové práce používán vratný materiál několikanásobně přetavený, bylo by dosaženo nižších hodnot dichte indexu, nežli v uvedených výsledcích.

## 5. Závěr

Předložená diplomová práce byla zpracována na téma: „Metalurgická příprava taveniny slitin hliníku pro výrobu odlitků vysokotlakým litím“. Tato práce se skládá z teoretické části, která je rešeršního charakteru a byla vypracována na základě prostudování uvedené literatury, ale také na základě návštěv vysokotlakých sléváren hliníku, odkud byly čerpány podklady pro vypracování praktické části diplomové práce.

Jak už bylo v této diplomové práci několikrát zmíněno, tak pro své široké využití především v převládajícím automobilovém průmyslu, mají odlitky ze slitin hliníku odlévané vysokotlakým způsobem významnou pozici na trhu.

Avšak přes uvedené rozsáhlé využití těchto odlitků, prakticky ve všech oblastech lidské činnosti, je třeba zdůraznit důležité a neopomenutelné kroky při jejich výrobě. V souvislosti s tématem této práce jde především o velkou afinitu hliníku ke kyslíku a s tím spojenou omezenou rozpustnost vodíku ve slitinách hliníku v tuhém stavu související s naplyněním taveniny a následným vznikem porezity u tlakově litých odlitků. Je třeba uvažovat i vznik  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , neboli korundu jehož teplota tání je až  $2050^\circ\text{C}$ . Těmto nepříznivým vlastnostem a jevům je však možné do jisté míry správně předepsaným technologickým postupem předcházet či je eliminovat tak, abychom na konci celého procesu dosáhli kvalitního tlakově litého odlitku vykazující požadované mechanické vlastnosti a předepsanou geometrii.

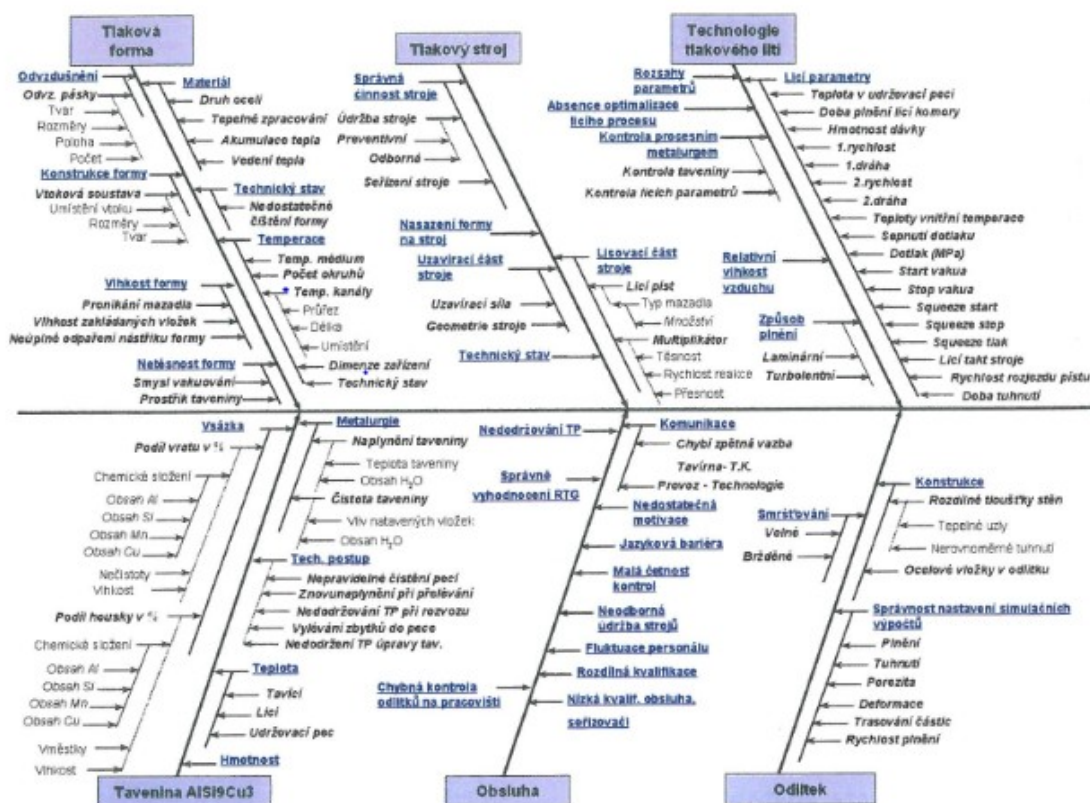
Dílčí poznatky, které je možno při výrobě odlitků ze slitin hliníku vysokotlakým způsobem aplikovat:

- 1) Do sléváren nakupovat kvalitní primární surovinu v houskách s odpovídajícím chemickým složením, nízkým stupněm naplynění a odpovídající makrostrukturou.

- 2) Tavit v příslušných tavících agregátech jen nezbytně nutnou dobu s potřebným (minimálním) přehřátím, bez víření taveniny.
- 3) Věnovat značnou pozornost rafinaci taveniny. Použití rafinačních solí a odplyňovacích zařízení za účelem důkladného odstranění vodíku a oxidických vměstků z taveniny.
- 4) Klást důraz na kontrolu kvality slitiny po každé operaci technologického postupu, tzn. zejména ověřovat skutečnou teplotu taveniny, chemické složení spektrální analýzou, naplynění taveniny vyhodnocením dichte indexu.
- 5) Neopomenout dodržovat nezbytnou kontrolu, údržbu a především čištění tavících a udržovacích pecí pro zachování jakostní a ekonomické výroby.

V teoretické části této práce je kladen důraz na správný technologický postup při vsázkování materiálu do tavící kelímkové pece. Dle [1] je nepřípustné, aby se materiál vsázel do již roztaveného kovu. Ovšem z důvodu velké energetické náročnosti tavení hliníkových slitin je tento postup v praxi jen zřídka dodržován. Při zavezení materiálu vždy do prázdného tavícího kelímku lze říci, že tavba může být delší až o 50% oproti stálému doplňování do již roztaveného kovu. Při úvaze desítek taveb denně se jedná pro slévárny o velké ekonomické náklady.

Závěrem komplexní problematiku vysokotlakého lití do jisté míry shrnuje Ishikawův diagram na obr. 29.



Obr. 29 Ishikawův diagram příčin ovlivňující jakost vysokotlakého odlitku [4]





## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [2] MICHNA, Š., I. LUKÁČ a V. OČENÁŠEK, aj. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. ISBN 80-890-4188-4.
- [3] Chvojka, J. a M. Brzobohatý. *Zpracování a použití hliníku a jeho slitin*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury a Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry 1961
- [4] *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2012, LX, 5-6. ISSN 0037-6825.
- [5] Vrtílek, J., *Stále nové úspory pro slévárny*, Prezentace společnosti Šebesta, s. r. o., 2011
- [6] Vrtílek, J., *Metalurgie, krystalizace a vznik vnitřních vad*, Prezentace společnosti Šebesta, s. r. o., 2012
- [7] Striko Westofen GmbH., *The Strikomelter*. Gummersbach, 2004.
- [8] Vlastní foto
- [9] II. Mezinárodní konference., *Aluminium 2001*, Děčín – Střelnice, 2001
- [10] Spectrolab, *Dokumentace Spectrolab Spark analyzer mix*, 2006
- [11] NOVÁ, Iva. *Teorie slévání*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 169 s. ISBN 978-80-7372-185-5.
- [12] Striko Westofen GmbH., *Technické podklady*





- [13] DGS Druckguss Systeme s. r. o. , *Materiály společnosti, 2013.*
- [14] Gruzleski, J. E. a B. M. Closset. *The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys.* The American Foundrymen's Society, Inc.
- [15] [Http://www.foseco.cz/cz/products\\_and\\_services/Download\\_Service/download\\_brochures.php](http://www.foseco.cz/cz/products_and_services/Download_Service/download_brochures.php). Wwww.foseco.cz [online]. 2004  
[cit. 2013-03-16]. Dostupné z: [www.foseco.cz](http://www.foseco.cz)





## 8. Přílohy

### Příloha 1

**DGS Druckguss systeme s.r.o.**

Datum: 25.2.2013

Cas: 13:03:46

#### Seznam analyz

Datum: 25.2.2013 Cas: 13:00:53 Odlitek nazev: 50%housky/50%vratný mate

Meril: Hentzel DGM: Tavba: 1 Jakost: 231-odlitek AXAPTA cislo: Kelímková plync

Zákazník:

Forma:

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ag	B
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
MaxExt 13,5	1,3	1,2	0,55	0,35		0,3	0,55	0,2		
MaxInt										
<b>Hodno 11,77</b>	<b>0,740</b>	<b>1,10</b>	<b>0,341</b>	<b>0,156</b>	<b>0,02600</b>	<b>0,02900</b>	<b>0,442</b>	<b>0,03600</b>	<b>0,00100</b>	<b>0,0005</b>
MinInte										
MinExte 10,5	0,6	0,7								
Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Ga	In	Li	Na
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
MaxExt				0,01						
MaxInt										
<b>Hodno &lt;0,00</b>	<b>0,00010</b>	<b>0,00150</b>	<b>0,00140</b>	<b>0,0014</b>	<b>&lt;0,00</b>	<b>&lt;0,00</b>	<b>0,0093</b>	<b>&lt;0,00</b>	<b>&lt;0,00</b>	<b>0,0012</b>
MinInte										
MinExte										
P	Pb	Sb	Sn	Sr	V	Zr	Al	Hg		
%	%	%	%	%	%	%	%	%		
MaxExt	0,2		0,1							
MaxInt										
<b>Hodno &lt;0,00</b>	<b>0,05600</b>	<b>0,01500</b>	<b>0,0190</b>	<b>&lt;0,00</b>	<b>0,00800</b>	<b>0,003985</b>	<b>2</b>	<b>&lt;0,00</b>		
MinInte										
MinExte										





## DGS Druckguss systeme s.r.o.

Datum: 25.2.2013

Cas: 13:03:36

### Seznam analyz

Datum: 25.2.2013 Cas: 12:59:15 Odlitek nazev: 100% housky/0% vratný ma

Meril: Hentzel DGM: Tavba: 1 Jakost: 226-odlitek AXAPTA cislo: Šachtová pec

Zákazník:

Forma:

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ag	B
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
MaxExt	11	1,3	4	0,55	0,55		0,55	1,2	0,25		
MaxInt											
Hodno	8,94	0,720	2,27	0,266	0,221	0,032	0,061	0,0960	0,034	0,002	0,0004
MinInte											
MinExte	8		2		0,05						
	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Ga	In	Li	Na
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
MaxExt					0,01						
MaxInt											
Hodno	<0,00	0,000	0,011	0,001	0,0019	<0,00	<0,00	0,009	<0,00	<0,00	0,0006
MinInte											
MinExte											
	P	Pb	Sb	Sn	Sr	V	Zr	Al	Hg		
	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
MaxExt		0,35		0,25							
MaxInt											
Hodno	0,004	0,087	<0,00	0,057	<0,00	0,006	0,030	0,066	86,3	<0,00	
MinInte											
MinExte											



### **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnou-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které na vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24.5.2013

Podpis:

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I use inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expense invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Datum: 24.5.2013

Signature: